



EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus-ja maaehitusinstituut

Reio Jüriöö

**EROSIOONISIMULAATORI KATSETAMINE
NÕLVAKATTEMATERJALIDE UURIMISEKS**

**USING AN EROSION SIMULATOR FOR TESTING SLOPE
COVER MATERIALS**

Magistritöö
Vesiehitus ja veekaitse õppekava

Juhendaja: dotsent Toomas Tamm, *DSc*

Tartu 2019

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Magistritöö lühikokkuvõte	
Autor: Reio Jüriöö		Õppekava: Vesiehitus ja veekaitse	
Pealkiri: Erosioonisimulaatori katsetamine nõlvakattematerjalide uurimiseks			
Lehekülgi: 75	Jooniseid: 34	Tabeleid: 8	Lisasid: 10
Osakond / Õppetool:		Maaehituse ja veemajanduse õppetool	
ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood:		Tehnikateadused T220	
Juhendaja(d):		dotsent Toomas Tamm, DSc	
Kaitsmiskoht ja -aasta:		Tartu, 2019	
<p>Reoveepuhastites tekib puhastusprotsessi kõrvalsaadusena toitaineterikast reoveesetet. Setet käideldakse ning selle tulemusel valmivat settekomposti saab taaskasutada. Settekomposti üheks võimaluseks on kasutamine teenõlvadel haljastusmulla asendajana. Settekompost on oma toitainete rikkuse poolest heaks kasvupinnaseks taimestikule. Selle tulemusel kiiresti kasvav taimestik kaitseks nõlvu sademete poolt põhjustatud erosiooni eest.</p> <p>Magistritöö eesmärgiks oli hinnata käesolevas töös käsitlevate nõlvakattematerjalide käitumist katsenõlval laboritingimustes, erinevate nõlvuste ja vihmaintensiivsuste korral. Katsed sooritati olukorras, kui nõlva pinnal puudus haljastus. Töös kasutati kokku seitset erinevat nõlvakattematerjali. Nõlvakateteks olid vee-ettevõtetest pärit reoveesette kompostid, reoveesette kompostid segatuna mineraalliivaga ja haljastusmuld.</p> <p>Nõlvakattematerjale uuriti varasemalt ehitatud erosioonisimulaatoriga. Lisaks määrati magistritöö käigus kasutatavate pinnaste füüsikalised parameetrid ning orgaanilise aine sisaldus. Teimimise käigus määrati nõlvakattematerjalide mehaanilised omadused – nidusus c ja sisehõrdenurk φ. Samuti selgitati välja laborkatsetega pinnaste veejuhtivusvõime.</p> <p>Katsetulemuste põhjal analüüsiti töös kasutatud nõlvakattematerjale ning hinnati nende kasutussobilikkust. Katsetega selgus, et reoveesette kompostide mitmed füüsikalised ja hüdrofüüsikalised omadused erinesid traditsioonilise haljastusmulla omadest.</p>			
Märksõnad: reoveesete, settekompost, teenõlv, tehisevihm, erosioon			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Reio Jüriöö		Curriculum: Hydraulic Engineering and Water Pollution Control	
Title: Using an erosion simulator for testing slope cover materials			
Pages: 75	Figures: 34	Tables: 8	Appendixes: 10
Department / Chair:		Chair of Rural Building and Water Management	
Field of research (CERC S) code:		Technological sciences T220	
Supervisors:		Assoc Prof Toomas Tamm, DSc	
Place and date:		Tartu, 2019	
<p>In wastewater treatment plants wastewater sludge forms as a side product of the water cleaning process. The raw sludge is processed and as a result a sludge compost is formed which can be recycled. One of the options to utilize the sludge compost is to use it as an alternative to traditional soil on the slopes of roads. Compost made from wastewater sludge is a good growing base for plants due to its richness with nutrients and fast-growing vegetation would protect the slopes from the eroding effect of precipitation.</p> <p>The purpose of the master's thesis is to evaluate the behavior of slope covering materials in this work, on an experimental slope in laboratory conditions, in different inclines of the slope, and rainfall intensities. The tests were followed through in a situation where vegetation was absent on the slope. Seven different slope cover materials were used in tests. Used materials were sludge composts from wastewater treatment companies, sludge composts mixed with mineral sand, and traditional soil.</p> <p>Slope cover materials were studied with an erosion simulator built beforehand. Additionally, the physical parameters, the content of organic matter, mechanical parameters - cohesion c and internal friction angle φ were assigned during the master's thesis. Also the water conduction abilities of the soils were determined with the laboratory tests.</p> <p>The slope cover materials used in the thesis were analysed and the test results and their usability were evaluated. Experiments revealed that several physical and hydrophysical properties of sludge compost differed from traditional soil.</p>			
Keywords: wastewater sludge, sludge compost, embankment, simulated rainfall, erosion			

SISUKORD

SISSEJUHATUS	6
1. REOVEESETE.....	8
1.1. Reoveesette käitlemine	8
1.2. Tugiained	10
1.3. Rakendus reoveesettele.....	10
1.3.1. Sette kasutamine	11
2. NÕLVADE ÜLDISELOOMUSTUS	14
2.1. Nõlva stabiilsus.....	16
2.2. Taimestik	18
2.3. Sademete mõju.....	18
2.3.1. Vihma intensiivsus.....	20
2.4. Gediminase nõlv	22
3. METOODIKA JA MATERJALID	24
3.1. Erosioonikatsete meetodika.....	24
3.1.1. Vihmasimulaator.....	25
3.1.2. Katsetatavad vihmaintensiivsused	26
3.1.3. Nõlvakast	27
3.1.4. Katsete käik	28
3.1.5. Erosioonistendi veebilanss ja veahinnang	29
3.2. Nihketugevuste määramine	30
3.3. Veejuhtivuse määramine	33
3.4. Kasutatavad materjalid	35
3.4.1. Orgaanilise aine sisalduse määramine	36
3.4.2. Materjalide lõimise määramine	37
3.4.3. Materjalide tunnusomaduste määramine	38
4. KATSETULEMUSED EROSIONISIMULAATORIL	42
4.1. Haljastusmuld	42
4.2. Ettevõtte A sete, ettevõtte A sete+liiv.....	44
4.3. Ettevõtte B sete, ettevõtte B sete+liiv	47
4.4. Ettevõtte C sete 1, ettevõtte C sete 2	49
4.5. Vooluhulkade jagunemine nõrga intensiivsuse korral.....	51
4.6. Vooluhulkade jagunemine keskmise intensiivsuse korral.....	53
4.7. Vooluhulkade jagunemine tugeva intensiivsuse korral	54
5. DISKUSSIOON	56
KOKKUVÕTE	60
KASUTATUD KIRJANDUS	62
LISAD	65
Lisa 1. Vihmaintensiivsuste katsetulemuste koondtabel.....	66
Lisa 2. Nõlvakattematerjalide nihkediagrammid	67
Lisa 3. Nõlvakattematerjalide vooluhulkade jagunemine I=0,5 mm/min nõlvuste 1:4 ja 1:3 korral.....	68
Lisa 4. Nõlvakattematerjalide vooluhulkade jagunemine I=0,5 mm/min nõlvuste 1:2,5 ja 1:2 korral.....	69

Lisa 5. Nõlvakattematerjalide vooluhulkade jagunemine $I=1,4$ mm/min nõlvuste 1:4 ja 1:3 korral.....	70
Lisa 6. Nõlvakattematerjalide vooluhulkade jagunemine $I=1,4$ mm/min nõlvuste 1:2,5 ja 1:2 korral.....	71
Lisa 7. Nõlvakattematerjalide vooluhulkade jagunemine $I=2,2$ mm/min nõlvuste 1:4 ja 1:3 korral.....	72
Lisa 8. Nõlvakattematerjalide vooluhulkade jagunemine $I=2,2$ mm/min nõlvuste 1:2,5 ja 1:2 korral.....	73
Lisa 9. Kasutatavate nõlvakattematerjalide päritolu ettevõtted	74
Lisa 10. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta	75

SISSEJUHATUS

Eestimaal on kokku 827 (seisuga 08.2018) reoveepuhastit (Bioneer 2018) ning koos reoveepuhastusprotsessiga kaasneb vältimatu kõrvalprodukti – reoveesete tekkimine. “Reoveesete on reoveest eraldatud vee ja tahke aine segu” (Keskkonnasõnaraamat 2004 s.v. reoveesete). Peamiselt iseloomustab setet rohke halvasti loovutatav veesisaldus, kõrge orgaanilise aine hulk, mitmete mikro- ja makroorganismide sisaldus ning kiire käärimisvõime (Kriipsalu *et al.* 2016). Reoveesete tekkimise hulk maailmas näitab seoses urbaniseerumisega tõusutendentsi. Järjest rohkem olmereovee- ja tööstusreoveeteketajaid liitub ühiskanalisisatsiooniga, teisalt survestavad erinevad riiklikul tasandil tehtavad õigusaktid ja strateegiad reovee ühtset kokkukogumist ning tagama keskkonna jaoks ohutut käitlemist (Drechsel *et al.* 2015). Seega reoveepuhastite hallata olev kliendibaas on suurenemas.

Euroopa suuremates puhastites toimub laialdaselt sette anaeroobne stabiliseerimine, eesmärgiga toota sellest biogaasi. See on laialt levinud ning seostub Euroopa Liidu energiapoliitikaga, kuna nii saavutatakse suurem energiasõltumatus ning kasutatakse reoveesete energeetilist potentsiaali (Regionaalsete...2015). Aastaks 2020 prognoositakse, et Euroopa Liidus tekib kuni 13 miljonit tonni (kuivainena) reoveesetet, see on umbkaudselt 45-56 g Euroliidu kodaniku kohta päevas (Swierczek *et al.* 2018). Reoveesete kasutus Euroopas sõltub reoveesete omadustest. Näiteks Hispaanias on laialt levinud sette kasutamine väetisena põllumajandussektoris, kuid Hollandis seoses settes oleva raskemetallide sisalduse tõttu sete põletatakse (Drechsel *et al.* 2015). Aasta jooksul tekib Eestis ligikaudu 167 000 m³ töödeldud reoveesetet ning seda on võimalik potentsiaalselt ära kasutada (Keskkonnaministeerium 2017c).

Reoveesete on vee-ettevõttele tülakas jääk, mis kuhjub puhasti territooriumil. Kuid samas on reoveesete ka tooraine, kuna settes on palju lämmastiku ning fosforit – selle tulemusel on settel palju potentsiaali põllumajanduses. Kasvavast rahvaarvust tingitud intensiivistuva põllumajanduse tagajärjel maailmas suureneb nõudlus fosforile, kuid see omakorda viib fosfori ammendumiseni ning tõstab selle hinda. Seega keskkonnale ohutu reoveesete kasutamine leevendaks probleemi. Lisaks põllumajanduslikule kasutusele otsitakse reoveesetele rakendust haljastuses, kus sete võiks näiteks asendada haljastusmulda.

Linnastumise käigus luuakse pidevalt uut infrastruktuuri. Tee muldkeha rajamiseks kasutatakse valdavalt liiva. Maakasutuse poolest on tähtis olla ökonoomne, kuna maa on enamasti eraomandis ning samuti piiravaks asjaoluks võib-olla ebasobilik reljeef – ehituseks tuleb täita maa-alasid, seetõttu rajatakse teed järsu nõlvusega. Ehitusperioodi ajal, kui teenõlvad ei ole veel kaetud nõlvakattematerjaliga ja pole tekkinud kaitsvat taimestikku, on vastehitatud nõlvad vastuvõtlikud sademete poolt põhjustatud erosioonile. Suure intensiivsuse ja sademetehulga korral toimub nõlvade ärauhumine katendilt nõlvale voolava vee mõjul ning tuleb teha lisatöid, et taaskord täita teenõlvu.

Huumusmulla asendajana on üritatud kasutada reoveesette komposti. Kahel vaadeldaval vegetatsiooniperioodil Hispaanias uuriti nõlvade (nõlvus 1:2) erosioonikindlust kasutades hüdrokülvi, kuhu oli lisatud reoveesetet. Võrdluskatse sooritati ilma reoveesette lisamiseta. Tulemustest selgus erosioonitekke vähenemine kaks kuni kolm korda, kui hüdrokülvis kasutati reoveesetet. Lisaks täheldati, et isegi kuival ja külmal ajal, kui valitsevad ebasoodsad kasvutingimused, saavutati reoveesetega töödeldud nõlvadel umbes 20% ulatuses taimkate. Seevastu ilma reoveesetteta nõlval ei tärganud taimkate (De Oña *et al.* 2011).

Magistritöö eesmärgiks oli hinnata käesolevas töös käsitlevate nõlvakattematerjalide käitumist katsenõlval laboritingimustes, erinevate nõlvuste ja vihmaintensiivsuste korral. Lisaks määrata kasutatavate materjalide ja pinnaste vajalikud pinnase füüsikalised parameetrid.

Käesolevas magistritöös on kasutatud osa andmeid, mis on varem publitseeritud Keskkonnaministeeriumi poolt tellitud aruandes „Soovitused reoveesette kasutamiseks nõlvadel“ (Tamm *et al.* 2018). Käesoleva töö autor teostas 2018. aasta detsembrikuus erinevate nõlvakattematerjalide nõlvakatsetused erosioonisimulaatoril.

Lõputöö valmimise eest tahan tänada juhendajat dotsent Toomas Tamme. Lisaks aitasid töö valmimisele kaasa professor Mait Kriipsalu ja õppeprorektor Endla Reintam. Abivalmiduse eest tänan Jaan Vagulat. Tänan ettevõtet AS Emajõe Veevärk.

1. REOVEESETE

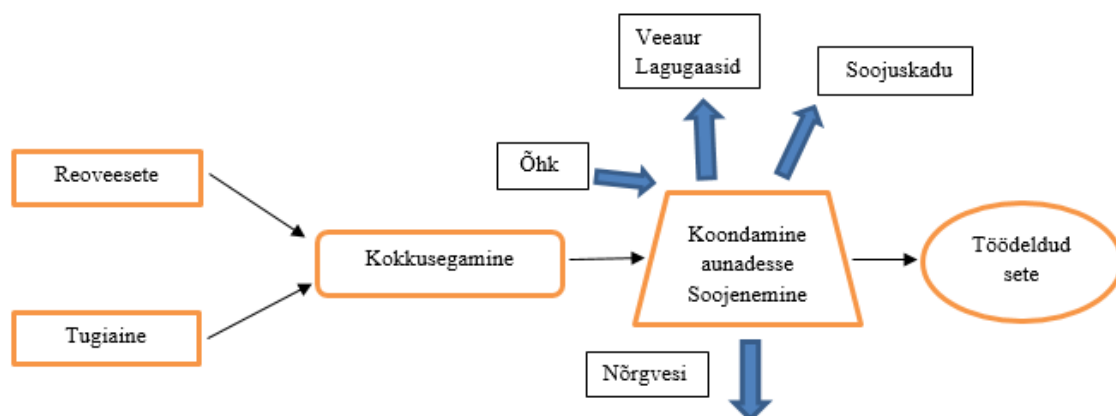
1.1. Reoveesette käitlemine

Reoveepuhastite suureks murekohaks on puhastusprotsessi tulemusel tekkiv sete ning selle mõistlik ning otstarbekas käitlemine ja kasutusvõimaluste leidmine (Maastik 1984). Primaarne puhastist tulev sete on väga veerikas, kuivainesisaldusega 2-8% ning setet tekib kuni 3% reovee hulgest. Sete jaguneb toorsetteks ning töödeldud setteks. Töödeldud ehk stabiliseeritud sete ei valmista ohtu inimestele ega looduskeskkonnale (Maastik *et al.* 2011). Settekäitluse prioriteetideks on vähendada reoveesette hulka, lagundada orgaaniline aine ning teha reoveesete kahjutuks mitmesugustest tõvestatavatest mikro- ja makroorganismidest (Maastik 1984). Tehnoloogiliselt setet käideldakse kolmel moel: tihendades, tahendades ning stabiliseerides. Reoveepuhasti üldkulutustest moodustab settekäitus ligikaudu 40–50%, seega on settekäitluse optimeerimine ökonoomsema tulemuse saavutamiseks tänapäeval väga aktuaalne (Kriipsalu 2016).

Väikepuhastites settekäitus algab sette tihendamisega, kus saavutatakse umbes 10% kuivainesisaldus. Sette tihendamise eesmärgiks on vähendada ruumalaliselt sette mahtu. Setet võib tihendada mehaaniliselt, näiteks variant on setet tihendada gravitatsioonilises settetihendis, raskusjõu toimel (Maastik 1984). Alternatiivina võib setet tihendada ka looduslikult, selleks avaneb võimalus, kui rajatakse settetiigid (Maastik *et al.* 2011). Setet tihendades jääb sete ikka oma suure voolavuse tõttu halvasti käideldavaks. Seetõttu setet tahendatakse, eesmärgiga eemaldada settest üleliigne vesi. Tahendamine toimub tsentrifuugi, pressfiltri või kruvipressi abil (Kriipsalu *et al.* 2016). Kuna setet iseloomustab võime siduda vett, siis kasutatakse vaba vee kättesaamiseks setteosakeste vahelt polümeerset kemikaali. Seda manustatakse sette hulka teatud vahekorras. Tahendamise tulemusel saavutatakse reoveesete, mille kuivainesisaldus on 15-20% (Maastik *et al.* 2011). Sette stabiliseerimise eesmärgiks on selles oleva orgaanilise aine osakaalu vähendamine. Lisaks muuta sete vabaks erinevatest patogeenidest ning tõvestavatest mikro- ja makroorganismidest (Lemmiksoo *et al.* 2015a). Eestis on levinud reoveesette stabiliseerimine bioloogiliselt – väiksemates puhastites stabiliseeritakse sete aeroobselt ning suurtes puhastites anaeroobsel meetodil (Maastik *et al.* 2011).

Näiteks Tallinna reoveepuhastis kasutatakse tehnoloogiliselt sette stabiliseerimiseks anaeroobset kääritamist (Tallinna Vesi 2019). Anaeroobse sette stabiliseerimise korral on võimalik settest toota biogaasi, mida saab kasutada energiaallikana. Hapnikuvabas keskkonnas orgaanilise aine lagunemise tulemusel tekib metaan (CH_4) ja süsihappegaas (CO_2) (Lemmiksoo *et al.* 2015a). Kogu protsess toimub suletud süsteemis, seega ebameeldiva haisu levimise tõenäosus on väiksem kui aunkompostimise puhul. Anaeroobse stabiliseerumise korral kasutatakse ära reoveesette nõ energeetiline potentsiaal ning edasi sete koondatakse aunadesse järelvalmimisse koos regulaarse läbisegamisega (*Ibid.*).

Eestis on enim levinum sette stabiliseerumise meetodiks aunkompostimine (joonis 1.1) välitingimustes (Lemmiksoo *et al.* 2015a). Kompostimise tulemusel settes olev orgaaniline aine lagundatakse bakterite, seente ja muude organismide poolt. Orgaanilise aine lagundamisel võib temperatuur tõusta üle 60°C , kui selleks on sobivad tingimused. Sellise temperatuuri korral, termofiilses faasis, toimub tõvestavate organismide hukkumine. Reoveesettele lisatakse tugiainet, et vähendada vee osakaalu settes, tugiaine peab lisades olema võimalikult kuiv, et ta imaks hästi settes olevat vett. Samuti tugiaine muudab setet rohkem poorsemaks. Poorsus on vajalik selleks, et aeroobsel lagunemisel õhk pääseks stabiliseeritavasse settesse (Kriipsalu *et al.* 2016). Sette soovitatav poorsus jääb vahemikku 30-60% (Maastik *et al.* 2011). Lisaks poorsusele ning üleliigse vee imavusvõimele sõltub tugiainest kompostis olev süsiniku ja lämmastiku suhe (C/N). See on kindel vahekord, mida orgaanilist ainet lagundavad bakterid vajavad ellujäämiseks. Näiteks kui C/N suhe on paigast ära, võivad aunas tekkida anaeroobsed vahelagusaadused, mille tagajärjel sete hakkab haisema. Haisust vabanemiseks võib setet segada lubjaga (Kriipsalu *et al.* 2016).



Joonis 1.1. Aunkompostimise põhimõtteline skeem (Kriipsalu *et al.* 2016).

1.2. Tugiained

Reoveesettele võib tugiaineks lisada näiteks puukoort, turvast, põhku, saepuru või hakkpuitu. Millist materjali tugiainena kasutada sõltub sellest, mis on majanduslikult otstarbekas, kuna tugiaine soetamine nõuab täiendavat materiaalist ressursi. Puukoor tugiainena on kergesti kättesaadav, kuid osakesed on tihti erineva tükisuurusega ning kvaliteetne kuiv puukoor on kallis. Turvas on oma omaduselt hea vett imav materjal, lisaks turbaga segatud reoveesete näeb kaubanduslik välja. Kuid turvas takistab õhu liikumist auna sisemusse, seetõttu tuleb auna tihti segada. Samuti pärsib turvas auna temperatuuri tõusu üle 40°C, seega tõvestavad mikroorganismid hävivad aeglasemalt. Põhu kasutamine tugiainena teeb auna hästi õhuliseks, selle tulemusel tõuseb kiirelt temperatuur. Põhupallid on kallid ning purustamine on töömahukas, värske põhk ei seo hästi vett. Õhuline aun kukub kergelt kokku, seega on vajalik tihe segamine. Saepuru ja hakkpuit on sobilikud tugiained sette kompostimiseks. Sõltuvalt hoiustustingimustest võivad saepuru ja hakkpuit kergesti mädaneda, kuid niiske tugimaterjali lisamise korral võidakse settes olev vesi imada halvasti. Lisaks on tegu kalli materjaliga (Maastik *et al.* 2011).

1.3. Rakendus reoveesettele

Reoveesete on oma koostisainete sisalduse poolest väga toitainerikas. Settes olev fosforisisaldus on suurem kui põllumullal. Kuna käesoleva sajandi lõppu prognoositakse fosfori defitsiiti, siis reoveesete kasutamine leevendaks antud probleemi (Lillenberg *et al.* 2011). Samal arvamusel ollakse Läänemere merekeskkonna kaitse komisjonis, kus jõuti kokkuleppele, et reoveesetet tuleb käsitleda pigem hinnalise toorainena kui jäätmetena (Keskkonnaministeerium 2017a).

Vastavalt Euroopa Parlamendi ja nõukogu direktiiv 2008/98/EÜ tuleneva jäätmehierarhia järgi tuleks jäätmeteket vältida (Keskkonnaministeerium 2018). Kuna reoveesete tekkimist ei ole võimalik vältida, siis tuleks sete muuta selliseks, et teda saaks ohutult uuesti ringlusse taaskasutamiseks võtta ning seeläbi välistada reoveesete rakendusest ladestumine. Seega tänapäeval leiab kasutust reoveesetest töötlemise tulemusena valminud settekompst (Keskkonnaministeerium 2017b).

Reoveepuhastit haldav veeettevõtte on jäätmeseaduse järgi jäätmetekitaja (Jäätmeseadus 2019, § 1 lg 2), seetõttu lasub vee-ettevõttel kohustus reoveepuhastusprotsessi tagajärjel tekkivat reoveesetet käidelda. Selleks vee-ettevõtte teeb toimingud settega ise või loobub settekäitlusest ning kasutab teenusepakkujana vastava jäätmekäitlusloaga jäätmekäitlejat (Keskkonnaministeerium 2017b). Sette kasutamist põllumajandusega seotud tegevustes, rikutud maa-alade kujundamisel ning haljastustööde tegemisel reguleerib Keskkonnaministri määrus “Reoveesette põllumajanduses, haljastuses ja rekultiveerimisel kasutamise nõuded” (Reoveesette...2019). Juulis 2017 ilmunud Keskkonnaministri määruse “Reoveesetest toote valmistamise nõuded” § 9 järgi reoveesete kaotab oma jäätmete staatuse, kui setet käideldakse kooskõlas määruses kehtestatud normidega ning sete vastab määruse lisades esitatud nõuetele (Reoveesetest...2019). Käesoleva määruse vastuvõtmine on muutnud seda, et varasemalt vee-ettevõtjad ei saanud settekomposti müüa, vaid pidid seda jäätmetena käitlema. Nüüd on aga võimalik turustada tootena nõuetele vastavat settekomposti (Keskkonnatehnika 2017).

1.3.1. Sette kasutamine

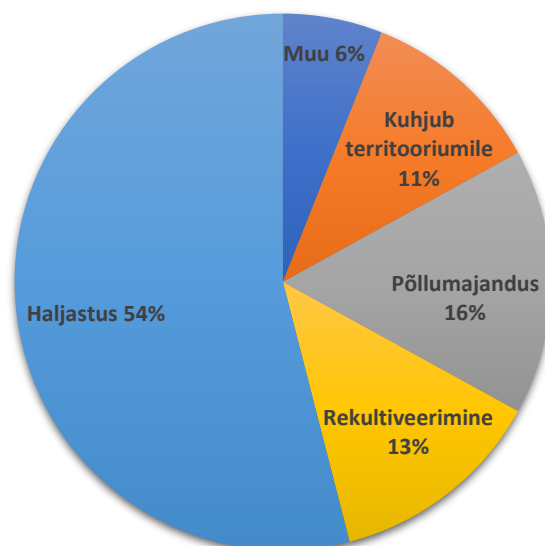
Reoveesetest valmistatud komposti saab kasutada põllumajanduses, haljastuses ning rikutud maaalade rekultiveerimisel. Teisalt pärsib reoveesetest valmistatud komposti kasutust sete negatiivne maine. Viimasel kümnendil on aktuaalseks muutunud ravimijääkide, hormoonide ning nanoosakeste sisaldus reoveesettes. Raskemetallide, patogeenide ja haigustekitajate sisalduse osakaal on reguleeritud seadusaktides, kuid ravimijäägid mitte. Seetõttu huvi komposti kasutada põllumajanduses on pigem negatiivne, kuna tarbijaskonda saadab hirm sette osas (Lemmiksoo *et al.* 2015a).

Haljastuse eesmärgiks on rajada nõlvadele taimede kasvuks sobilik pinnasekiht. See koosneb traditsiooniliselt huumusmullast. Kihi paksus sõltub muruklassist, kuid jääb vahemikku 5-15 cm (Maanteeamet 2018). Teenõlvade haljastamisel settekompostiga on olulisteks faktoriteks nõlva välimus ning ebameeldiva haisu puudumine. Esmane välimus sõltub sette sõmerusest ning selle töödeldavusest – kui lihtsasti on nõlv tihendatav või kui ühtlaselt saab nõlvakattematerjali rajada. Lisaks võivad settekompostid sisaldada erinevaid tahkiseid, mis on settesse jäänud puhastusprotsessi ajal või sattunud settesse koos tugiainete lisamisega. Selle tagajärjel võib haljastatav nõlv sisaldada näiteks rohkesti puitmaterjali tükikesi. Lahendusena saab kõige pealmises kihis kasutada sõelutud mulda, mis visuaalselt muudab

nõlva ühtlaseks ning varjab ära aluskihina kasutatava settekomposti. Seega nõlvakattematerjal on üheltpoolt visuaalselt kena, kuid samas säilib toitainerikkus. Koos mulla kasutamisega võib settekomposti hulka segada liiva. Oluline on saavutada optimaalne konsistents ning seeläbi muutub settekompost rohkem töödeldavamaks (Lemmiksoo *et al.* 2015b).

Venemaal Lääne-Siberis viidi läbi uuring, kus reoveesete segati kohaliku kasvupinnasega. Sete ja kasvupinnas segati erinevates vahekordades. Sette ja pinnase segu kasutati maa-ala rekultiveerimiseks. Settesegust pinnasele külvati muruseeme. 60 päeva pärast muruseemne külvamist lõigati muru ning selgitati välja taimekasvu erinevad parameetrid. Selgus, et muru kasvas kõige intensiivsemalt ja tihedamalt, kui sette osakaal pinnases moodustas ca 25% kuivmassina. Seeläbi antud katsete käigus saavutati parim tulemus, kui reoveesete ja pinnas segati omavahel vahekorras 1:3 (Maksimova *et al.* 2015).

Aqua Consult Baltic uurimusest selgus, et üle 2000 ie (inimekvivalent) reoveepuhastite töödeldud reoveesetest kasutatakse enim haljastuses (joonis 1.2). Juba märksa vähem kasutatakse põllumajanduses ning erinevate alade rekultiveerimiseks. 11% töödeldud reoveesetest ei leia paraku kasutust ning seetõttu kuhjub reoveepuhastite territooriumile (Regionaalsete... 2015).



Joonis 1.2. > 2000 ie reoveepuhastite töödeldud reoveesete kasutus (Regionaalsete... 2015).

Näiteks Riigimetsamajanduskeskus (RMK), Maanteeamet (MNT), kohalikud omavalitsused (KOV) või muud riigiasutused võiksid tulevastel ehitamisega seotud töödel hanketingimuste koostamisel lähtuda mõttest, et teatud tööde puhul, mingis osakaalus võiks kaaluda reoveesetest komposti kasutamist. Selline tegevusviis kasvataks antud toote kohta usaldust ning aitaks leida materjalile rakendust – oleks keskkonnasõbralik lähenemine, kuna väheneks reoveesetest valmistatud komposti kuhjumine (Keskkonnaministeerium 2017b). Põllumajandussektoris ei taheta kasutada reoveesetest valmistatud komposti, kuna ollakse skeptilised antud toote ohutuses. Kardetakse, et toidu kasvatamisel võivad settes olevad ühendid olla tarbijatele ohtlikud. Kuid haljastuses, näiteks huumusmulla asemel kasutamine oleks hea alternatiiv, kuna seeläbi taimekultuurid kasvaksid jõudsamalt ning puuduks vajadus kasutada väetist.

2. NÕLVADE ÜLDISELOOMUSTUS

Erinevatel nõlvadel toimuvaks füüsikaliseks erosiooniks nimetatakse olukorda kui vee, jää, tuule või raskusjõu mõjul eemaldatakse pinnasest pinnaseosakesi (Astover *et al.* 2012). Erosiooniprotsessi mehaanilist toimet teenõlvadele võib käsitleda kui (Gray, Sotir 1996):

- pinnaseosakeste eraldamine;
- pinnaseosakeste transportimine.

Erosioonist tingitud negatiivsete tagajärgede kaitsmiseks püütakse minimeerida eelpool mainitud toimete ulatust. Selleks kasutatakse erinevaid meetmeid. Võimalik on kasutada loodussõbralike erosioonitõkkematte ja tehismaterjalist geokärgi. Eesmärgiks on vähendada vihmaveest tingitud kineetilise energia mõju. Selleks vähendatakse valguva vee kiirust, et vee kaasatõmbejõud ei oleks suur või juhitakse vesi näiteks mööda kindlustatud sānge. Samuti saab suurendada nõlva vastupidavust kasutades sobilikust pinnasest nõlvakattematerjali (*Ibid.*).

Erosioon jaguneb mitmeteks erinevateks alaliikideks, mida käsitletakse läbi konkreetse nähtuse mingile objektile. Kirjanduse andmetel enam levinud erosiooni põhjustajateks on tuul ja sademed (*Ibid.*).

Tuuleerosioon koosneb kolmest erinevast faasist: pinnast moodustavate osakeste eraldamine, transport ja osakeste kuhjamine (*Ibid.*). Tuuleerosiooni korral võib tuul kiirusega 4,5-6,7 m/s kanda kuni 0,25 mm liivaosakesi. Ainult suhtelised kuivad pinnaseosakesed on tuule mõjule vastuvõtlikud. Asukoha poolest on Eestis tuuleerosiooni tundlikud Lääne-Eesti saared ning rannikualad, kus puudub kõrghaljastus, mis leevendaks puhangute mõju pinnaseosakestele. Mandri-Eestis esineb tuuleerosioon ainult tormituulte ajal. Vastavalt viimase 30 aasta andmetel koostatud Euroopa tuuleerosiooni kaardi järgi on Eestis tuuleerosiooni oht minimaalne (Astover *et al.* 2012).

Sademetest tingitud erosioon võib toimuda: langeva piisa kineetilise energia toimel, vee pinduurstuse või vooluvee vagu-uurstuse mõjul. Nõlva vastuvõtlikkus vihmaerosioonile sõltub nõlva pinnase struktuurist ning parameetritest, vihmajõu intensiivsusest koos kestvusega, taimkatte olemasolust ja nõlva kallakust. Intensiivse jõu korral paiskub vihmapiiskade langemisenergia tõttu palju pinnast õhku ning seeläbi pinnaseosakesed

muudavad asukohta (Gray, Sotir 1996). Saju ajal langevad vihmapiisad lagundavad pinnase pealmisi osakesi ning selle tulemuse käigus tekkinud purunenud osakesed ummistavad pinnasepoore, mistõttu on raskendatud vee imendumine ja väheneb pinnase õhustatus. Selle tagajärjel halveneb infiltratsioon, vesi ei suuda efektiivselt liikuda enam läbi pinnase ning kallakuga aladel raskusjõu toimele tekivad pindmine äravool põhjustab osakeste nõlvalt ärakandumist (Astover *et al.* 2012). Pinduurstuse tõttu kallakulisel alal toimub pinnase eemaldumine õhukeste kihtide kaupa. Pinduurstust tekitav voolava vee kiirus on kuni kümme korda aeglasem, kui vihmapiiskade langemiskiirus – seega energeetiliselt on tegu vähem kahjustavama protsessiga. Vagu-uurstuse korral pinnaseosakesed eemalduvad mööda sajuhoogude kasvu tagajärjel tekkinud väikeseid kanaleid pidi. Voolukiirused on suuremad kui pinduurstuse puhul, seetõttu toimub juba suuremate osakeste väljajanne nõlvalt (Gray, Sotir 1996).

Teedeehituses on erosiooniohtlikud just valminud nõlvad, kus puudub nõlvakindlustus ning taimestik ei ole veel tärganud. Sageli on nõlvad (joonis 2.1) rajatud järsu nõlvusega, kuna lauged nõlvad nõuaksid üleliia teemaad, mis on tihti eraomandis. Erosioon on intensiivsem järsematel nõlvustel ning seetõttu põhjustatakse rohket sette ärakannet nõlvalt, lisaks toitainete ja seemnete kadu nõlva pinnalt, selle tagajärjel on hilisemalt raskem teha nõlva taastustöid. Kasutades settekomposti nõlvakattematerjalina võib taimestik kasvada kiiremini, kuna settekompost on oma olemuselt väga toitainerikas. Kiire kasvu läbi väheneb erosioon, sest taimestik käitub kui nõlvakindlustis (Cerdà 2007).

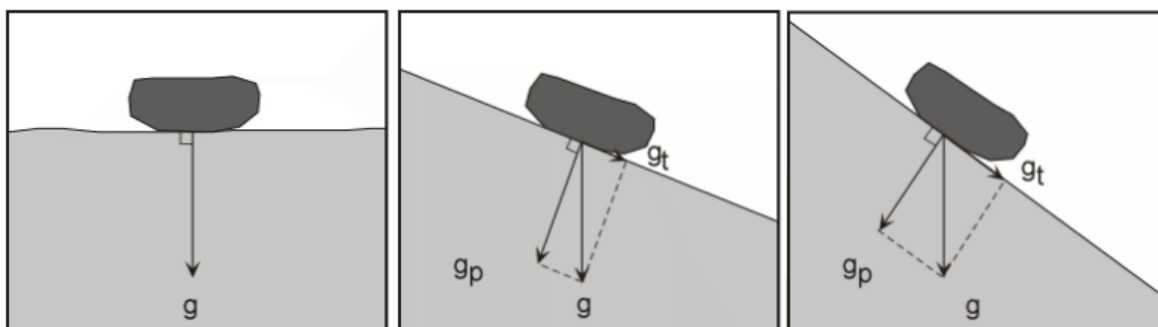


Joonis 2.1. Ehitusaegne olukord ja nõlvakattematerjaliga kaetud nõlva lagunemine Tartus Idaringtee näitel (autori foto).

2.1. Nõlva stabiilsus

Nõlvade puhul tekitavad pinnases pingeid nõlva ülemise ja alumise ääre vaheline kõrguste erinevus. Gravitatsioonijõu olemasolu tõttu tekivad nõlvades pinged ning nõlv tahab nihkuda allasuunas. Kui nihkepinge ületab nihketugevuse väärtuse, siis toimubki nõlva varisemine. Samuti aitavad nõlva varisemisele kaasa intensiivsed sajuhood, kus sajab korraga palju ning pinnas ei suuda kogu vett vastu võtta, lisaks veel pinnavee olemasolu ja selle liikumine ning erinevad staatilised- ja dünaamilised koormused (Jaanisoo 2011).

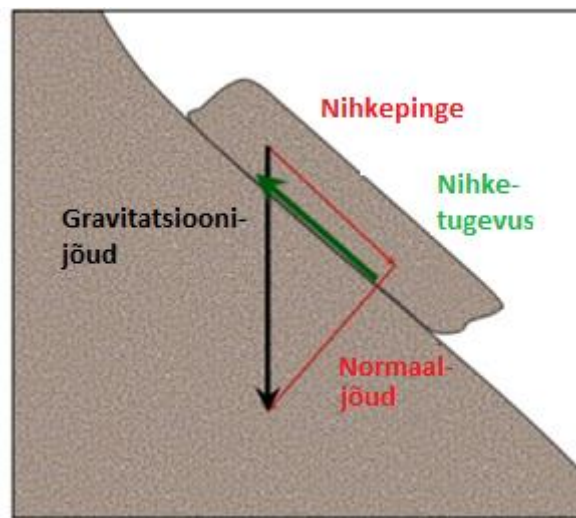
Raskusjõud on üks erosiooni põhjustajatest, kui pinnaseosakesed jõu toimele hakkavad eemalduma oma statsionaarsetelt asukohtadelt (Astover *et al.* 2012). Seetõttu raskusjõu ehk gravitatsioonijõu mõjumise tagajärjel toimub erosioon kallakuga aladel. Tasapinnal mõjub gravitatsioon pinnaseosakestele otsesihis allasuunas. Erinevate nõlvuste korral aga saab gravitatsioonijõu jagada kaheks komponendiks (joonis 2.2) – nõlvaga risti olevaks komponendiks (*component acting perpendicular* g_p) ja nõlvaga tangentsiaalseks (samas sihis) komponendiks (*component acting tangential* g_t) (Nelson 2013).



Joonis 2.2. Raskusjõu jagamine komponentideks tasapinnal ja erinevate nõlvuste korral (Nelson 2013).

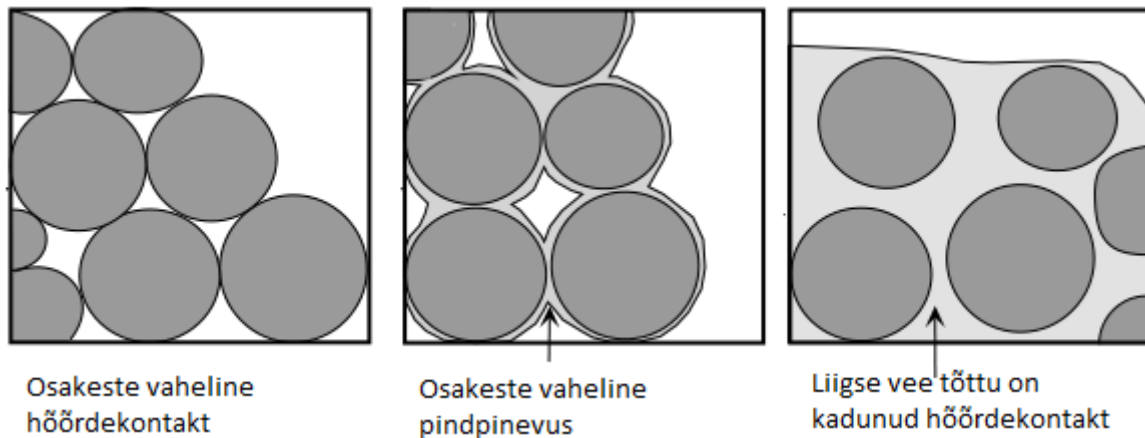
Risti olev komponent g_p , nimetatakse ka normaaljõuks (*normal force*), hoiab pinnaseosakesi nõlva peal paigal, nõlvaga samas sihis olev komponent g_t aga põhjustab pinnaseosakeste nihkumist ehk nihkepinget (*shear force*), üritades materjali nõlvalt alla viia. Mida järsemaks muutub nõlv, seda suuremaks muutub komponent g_t osakaal ning komponent g_p mõju väheneb. Materjali nõlva sihis alla liikumist takistavad hõõrdejõud, pinnasemassiivi enda nihketugevus (*shear strength*) ning pinnaseosakesi kooshoidev nidusus. Kui nihkepinge muutub suuremaks kui jõud (joonis 2.3), mis hoiavad pinnast paigal, siis toimub nõlvas pinnaseosakeste liikumine allasuunas ning nõlv variseb. Kui nõlvakattematerjal koosneb erineva nidususega pinnaseosakestest, siis olukorras kui nihkepinge ületab nidusust,

nõrgema nidususega materjalid liiguvad jõu mõjul alla – erodeeruvad ja teised osakesed jäävad paigale (*Ibid.*).



Joonis 2.3. Pinnaseosakesi mõjutavad jõud (Earle 2015).

Vesi võib avaldada nõlvale mõju seoses maha sadava vihma või kevadel lumesulamise tulemusel tekkiva pinnavee poolest. Vee tungimisel pinnasesse esmalt vesi täidab pinnase osakeste vahelised poorid kuni pinnase küllastuvuseni. Kuna vesi on raskem kui õhk, siis seeläbi pinnase mass suureneb. Näiteks kuiv turvas on võimeline imama endasse palju vett ning seeläbi kuiva turba mass suureneb mitmekordselt. Samuti savimineraale sisaldavad pinnased seovad endaga vee ning seeläbi pinnase tugevus väheneb võrreldes kuiva olekuga. Suureneva massi tõttu kasvab raskusjõu mõju nõlvale ning toimub pingete võimendumine ja selle tagajärjel võib nõlv muutuda ebastabiilseks (Nelson 2013). Samuti sõltub pooridevahelisest veesisaldusest (joonis 2.4) pinnasemassiivi varikaldenurk (*angle of repose*). See on nõlva järsim nurk, mille juures on tagatud kujukindlust ning stabiilsus. Varikaldenurk sõltub pinnast moodustavate osakeste fraktsioonist. Kuivade tingimuste korral püsib pinnas koos selle osakeste omavahelise hõõrdekontakti koostoimel. Kergelt märjad tihendamata osakesed saavutavad suurema varikaldenurga, kuna pinnaseosakeste vahel olev vesi moodustab koosmõjul teradega vedeliku tõmbejõu ehk pindpinevuse, mis suudab osakesi koos hoida. Olukorras kui materjal on liigselt veega küllastunud, siis pinnaseosakeste vahel puudub hõõrdekontakt ja pindpinevus. Selle tagajärjel pinnas ei ole enam kujukindel ning nõlv võib muutuda ebastabiilseks (Nelson 2013).



Joonis 2.4. Vee erinev osakaal pinnases (Nelson 2013).

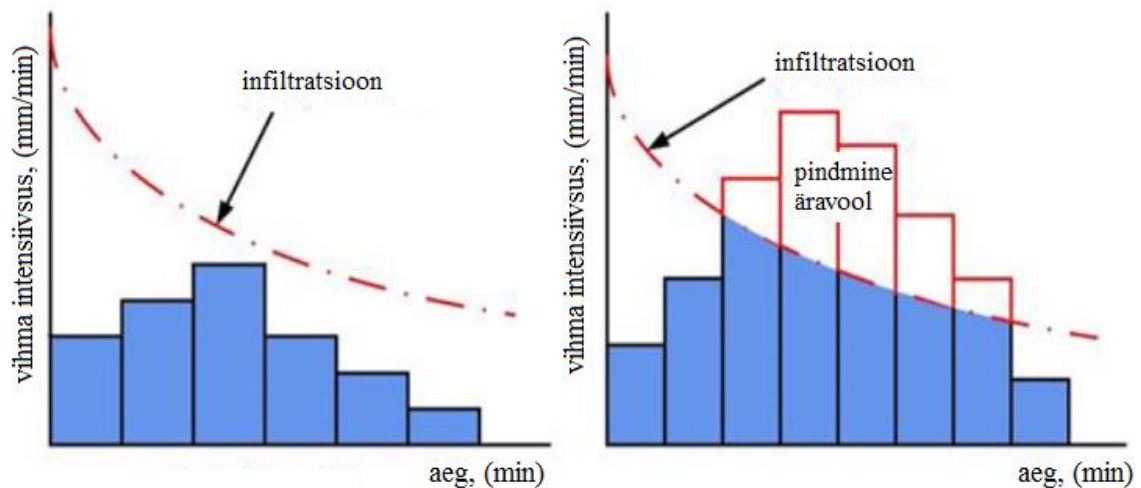
2.2. Taimestik

Tihe rohttaimestik nõlval kaitseb pinda erosiooni eest ning vähendab hulgaliselt mullakadusid. Taimestik võtab vastu intensiivse sajuhoo energia ja kaitseb pinnast vihmapiiskade lõhkuva toime eest. Taimed ja nende jäägid säilitavad pinnases poorsust ja läbilaskvust, aeglustades seega pindmise äravoolu algust. Taimejuured seovad füüsiliselt pinnaseosakesi ning pinnal olev osa hoiab kinni äravooluga valguvat setet. Lisaks taimede varred ja lehed suurendavad pinna karedust ning selle tulemusel äravoolu kiirus aeglustub (Gray, Sotir 1996). Taimestik rajatakse haljastatavale nõlvale näiteks kasutades hüdrokülvi. Hüdrokülvi puhul pihustatakse spetsiaalne segu surve toimele ettevalmistatud alale. Segu koosneb erineva idanemiskiirusega seemnetest, toitaineterohketest lisanditest, orgaanikast ja veest ning segu valik sõltub pinnasest ja kliimatilistest tingimustest. Kogu tööprotsess on kiire ja ökonoomne, segu moodustab haljastatava pinnaga seotud kihi, selle tulemusel haljastatavale pinnale peale nõrguv pinna- või sademetevesi ei saa hüdrokülvi ära uhtuda (*Ibid.*).

2.3. Sademete mõju

Üheks käesoleva sajandi märksõnaks võib pidada kliimamuutuseid. Kasvuhoonegaaside osakaalu kasv atmosfääris on kaasa toonud õhkkonna veeauru ja energeetilisuse suurenemise, mille tagajärjel suureneb ekstreemsete sademete hulk (Kamenik 2015). Sademete hulka mõõdetakse kui horisontaalsele pinnale moodustunud veekihi paksust millimeetrites (Tammets 2012).

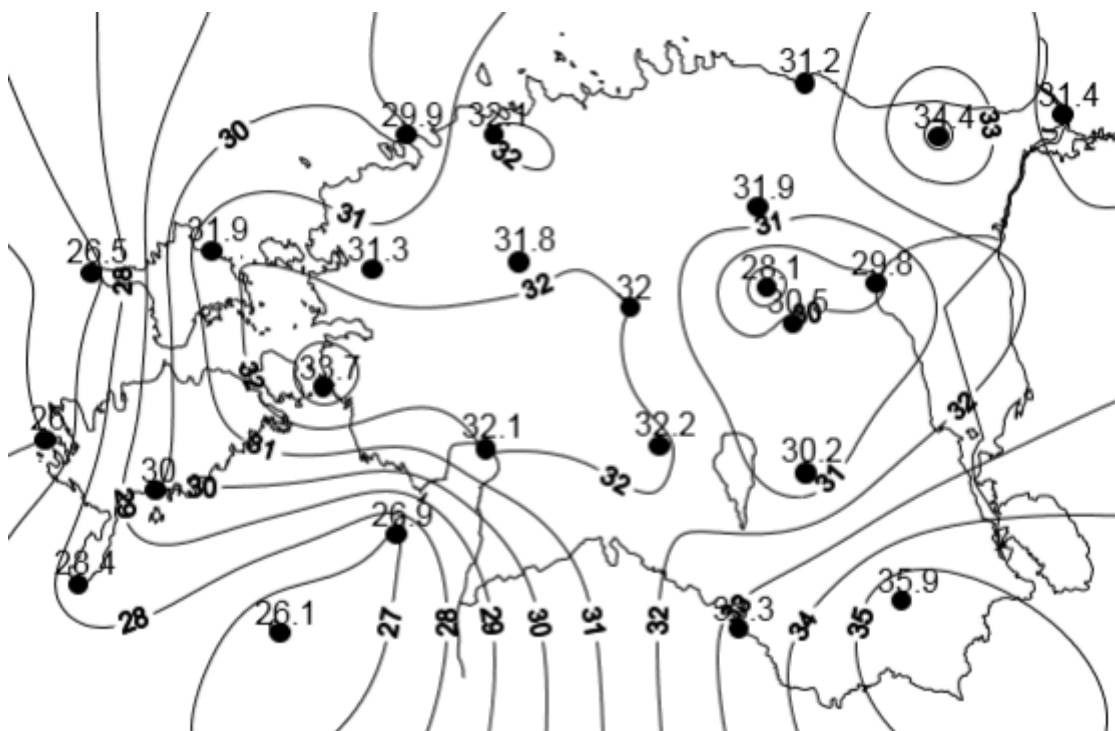
Sademed jõudes nõlvale hakkavad infiltreeruma (joonis 2.5). Infiltreerumisvõime sõltub pinnase veeläbilaskvusest. Olukorras, kui sademete intensiivsus on nõrgem, kui pinnase veeläbilaskvus, jõuab kogu maha sadav vesi imbuda sügavamale aluspinnasesse. Kui aga vihmaintensiivsus suureneb ning ületab vastuvõttu, siis moodustuvad pinnale loigud ning kallaku olemasolul hakkab toimuma pindmine äravool. Küllastunud pinnases on pindmise äravoolu tekkides veeläbilaskvusvõime saavutanud sama väärtuse vihmaintensiivsusega (Chaithong 2017). Saju alghetkel on pinnase veevastuvõtu võime suurem, kuid väheneb ajaga. Kuiv pinnas võtab paremini vett vastu kui niiske. Infiltatsioonivõime sõltub näiteks pinnase pooride suurusest, pinnase tihedusest ja orgaanilise aine sisaldusest. Orgaaniline aine seob pinnase struktuuri, vähendades seeläbi vihmajärgi kineetilise energia mõju pinnakihi (Sahin 2013).



Joonis 2.5. Infiltatsioonivõime olukorrad (Chaithong 2017).

Riigi Ilmateenistuse (2019b) järgi peetakse ohtlikuks vihmajärgi olukorda, kui kuni 12 tunni jooksul sajab 15-49 mm. Eriti ohtliku all mõistetakse sajuhulka 30 mm ühe tunni või lühema aja jooksul ning vihmajärgi üle 50 mm, mis sajab kuni 12 tunni vältel. Ohtlike vihmajärgidega võivad kaasuda tõrked liikluses, teede ja tänavate uhtumine, madalamate alade üleujutamine. Kamenik (2015) tööst selgub, et vaadeldaval perioodil, aastatel 1961-2005 on väga tugevate vihmade hulk tõusnud suveperioodil 8,2% ning talveperioodil 4,8%, samuti on välja toodud 2-aastasele korduvusperioodile vastavad ööpäevased sademed asukoha lõikes (joonis 2.6). Enim võib ööpäevs sadada Jõhvi ning Võru kandis ning vähem

Lääne-Eesti saartel. Samal ajaperioodil on 100 mm või rohkemat sademete kogust ööpäevas mõõdetud vaid 12 korral (Tammets 2012).



Joonis 2.6. 2-aastasele korduvusperioodile vastavad ööpäevased sajuhulgad 1948-2013 aastate andmetel (Kamenik 2015).

Tavatingimustes võib ühe vihmajärgu kestvus olla kuni 48 tundi. Kõige pikem ekstreemne vihmajärg on registreeritud 1996. aastal Väike-Maarjas, mille kestvus oli 57 tundi järjest. Kuni 12 tundi kestvad vihmajärgud leiavad aset enim sügiskuudel, rohkem oktoobris. Kaua kestvad sajuperioodid põhjustavad maa-alade üleujutusi. „Liigsajupäev on päev, mil koos eelneva 9 päevaga on ööpäeva sademete hulk olnud keskmiselt 10 mm või rohkem” (Tammets 2012). Sageli on liigsajupäevi enim olnud juuli- ja augustikuul (*Ibid.*).

2.3.1. Vihma intensiivsus

Vihma intensiivsuseks nimetatakse mingi aja jooksul sadavat sademete hulka, mida mõõdetakse millimeetrites (Tammets 2012). Vihma intensiivsus leitakse valemiga 2.1.

$$I = \frac{P}{t}, (2.1.)$$

kus I on vihma intensiivsus mm/min;

P – saju ajal maha sadanud vihm mm;

t – saju aeg min.

Suurim 10 minuti jooksul mõõdetud sademete intensiivsus on olnud 2,3 mm/min. Tabelis 2.1 on välja toodud mõõdetud väärtused intensiivseimate vihmade kohta Eestis (Tammets 2012).

Tabel 2.1. Intensiivsemaid mõõdetud vihmasid Eestis (Tammets 2012)

Jaam	Kuupäev	Aeg (min)	Intensiivsus (mm/min)
Tooma	23.07.1957	3	3,57
Jõhvi	23.07.1957	3	3,34
Tooma	23.07.1957	10	2,30
Vilsandi	22.08.1967	4	0,95
Jõhvi	03.08.1978	13	0,94
Tiirikoja	03.06.1980	5	1,24
Tallinn	04.05.1996	20	1,22
Vilsandi	19.08.1999	6	1,10
Jõhvi	31.08.2003	10	0,80
Võru	13.05.2011	10	1,07

Teaduskirjanduses on intensiivseks vihmasajuks loetud olukorda, kus sademeid on niipalju, et maha sadanud vesi ei jõua pinnasesse infiltreeruda. Intensiivne sadu ei kesta väga kaua vaid on tsükliline, koosnedes mitmest erinevast intensiivsusega osast. Ajaline kestvus on reeglina vähem kui tund aega ning sadu on ajas ja ruumis väga varieeruv. Näiteks ühes linnas võib sadada samaaegselt väga erinevalt. Suvel sajab valdav osa vihmast minimaalse aja jooksul. Seetõttu suvisel ajal katteta teede liivanõlvad on eriti kergesti vastuvõtlikud erosiooni negatiivsetele tagajärgedele. Vihmasadude algused on tugeva intensiivsusega, saju lõpp seevastu nõrga intensiivsusega. Tugevad vihmasajud Eestis on põhjustatud kiirest sooja ja niiske õhu tõusu tulemusel tekkinud rünsajupilvedest (*Cumulonimbus*). Samuti soodustavad tsüklonid selliste olukordade tekkimist (*Ibid.*).

2.4. Gediminase nõlv

Nõlvaerosiooni probleemid tulevad välja eriti pika nõlva ja suure nõlvusega objektidel. Selliseks näiteks on Leedus Vilniuses asuv Gediminase mägi ja UNESCO maailmapärandisse kuuluv Gediminase kindlus, mis on riigi väga tähtsad kultuurilised ja muinsuskaitseobjektid. Seevastu Gediminase mäe nõlvad on olnud probleemsed juba alates 14. sajandist kuni tänapäevani (Skuodis 2018).

Gediminase mägi on umbes 48 meetri kõrgune ning mäe nõlvade kalle on 37°-43°, mõnes kohas kuni 54°. Seega võib väita, et tegu on väga järskude nõlvadega (1:1,5 nõlvus on 34°). Kliimaatilistest oludest on aastane keskmine temperatuur 6,1 - 6,7°C ning sademete hulk keskmiselt 658 mm aastas (*Ibid.*), analoogne Eesti kliimale (Riigi Ilmateenistus 2019a).

Läbiviidud geoloogilistest uuringutest on selgunud, et Gediminase mägi koosneb heterogeensetest pinnasekihtidest, mille veeläbilaskevõime on varieeruv. Puuraukude abil tehti kindlaks, et mäe sees on kaks põhjaveekihti. Vesi satub pinnasesse, kui mäe tipus lumesulamisvesi ja sademete vesi infiltreerub ning jõudes vett halvasti läbilaskva kihini vee liikumine peatub. Seetõttu on nõlvadele tekkinud allikad, mille tagajärjel toimub erosioon ning nõlva stabiilsus on vähenenud, samuti loetakse seda põhjuseks, mis tekitasid varasemalt suure maalihke. Aastal 2011 eemaldati nõlvadelt madal- ja kõrghaljastus (puud, põõsad) eesmärgiga taastada ajalooline vaade. Seetõttu toimus 2016 aastal uus maalihe (joonis 2.7), kuna taimestiku eemaldamise tagajärjel oli nõlv muutunud ebakindlamaks: põhjaveepind tõusis, juurestiku osakaal oli vähenenud, tuule mõju suurenes. Rikutud nõlva taastamistöödel eemaldati varisenud nõlvadelt vana pinnas. Varasemate taastustööde raames lihkunud nõlvad täideti vaid kohaliku täitepinnasega, ilma insener-tehnilisi lahendusi kasutamata, kuid aastal 2016 toimunud intsidendi tagajärjel nõlvad kindlustati dolomiiti sisaldavate gabioonidega, ehitati töötav drenaažisüsteem. Nõlvakattematerjalideks rikutud aladel kasutati geosünteesi ja kookosmatte (Skuodis 2018).



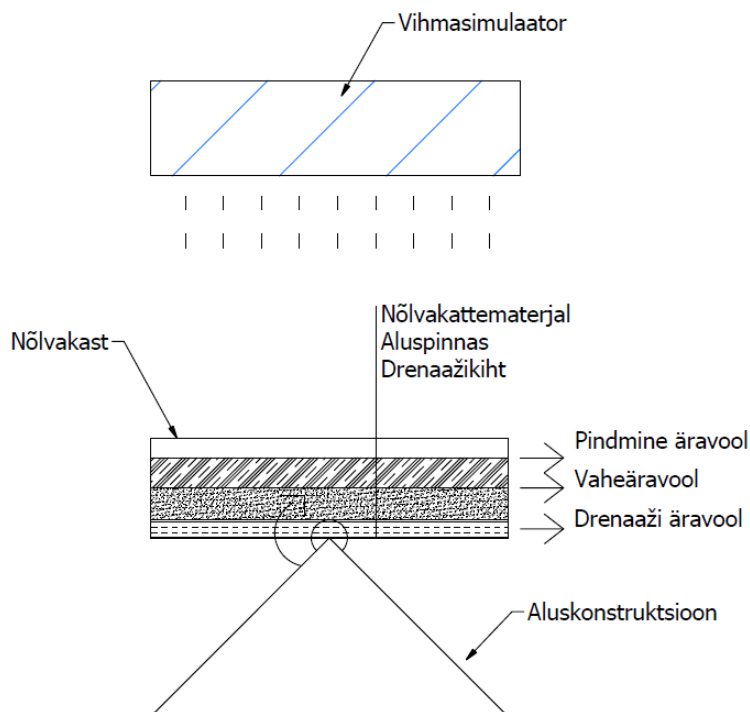
Joonis 2.7. Rikutud nõlva taastamine (Skuodis 2018).

3. METOODIKA JA MATERJALID

3.1. Erosioonikatsete meetoodika

Käesolevas magistritöös kasutati Vagula (2018) poolt ehitatud erosioonisimulaatorit (joonis 3.1). Erosioonisimulaatori moodustavad vihasimulaator ja nõlvakast. Katsetati seitset erinevat nõlvakattematerjali ning katsed viidi läbi Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituudi veemajanduse õppetooli ruumis D169.

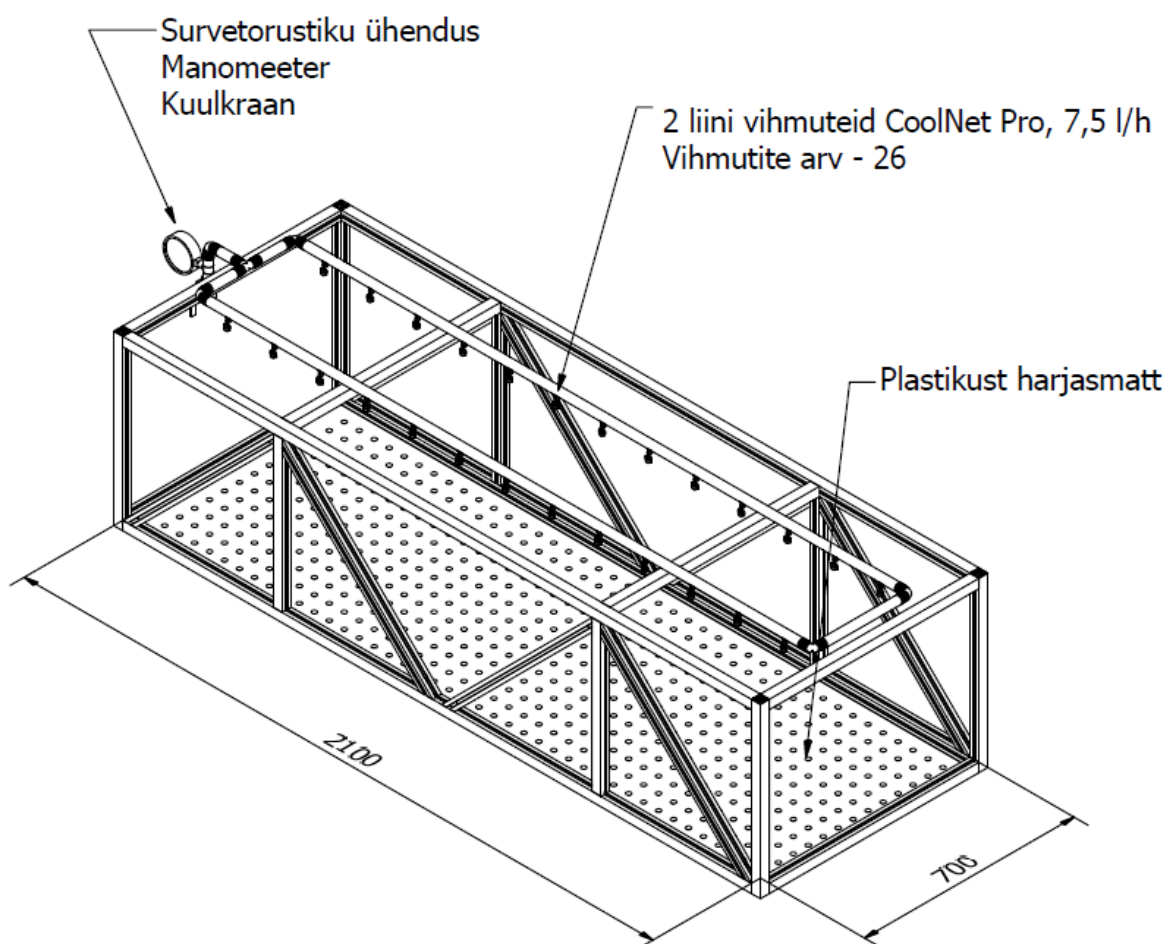
Magistritöö autor täiendas eelnevalt ehitatud erosioonisimulaatorit. Selleks, et mitte sõltuda ühisveevärgi veesurve ja tagada stabiilne sisendsurve erosioonisimulaatorisse, otsustati kasutada survetõsteseadet SCALA2. Survetõsteseadmega on võimalik saavutada olemasolevate düüsidega suuremat vihmaintensiivsust, kuna survetõsteseade suudab tagada rõhu kuni 5 bar. Survetõsteseade asub vahetult pärast veeallikat. Töös sooritati katsetused erosioonisimulaatoril rõhu 4 bar korral.



Joonis 3.1. Erosioonisimulaatori tehnoloogiline skeem (Vagula 2018).

3.1.1. Vihmasimulaator

Vihmasimulaator (joonis 3.2) on seadeldis, millega on võimalik kunstlikult tekitada erinevate intensiivsustega sademeteeffekti ning seeläbi uurida sademete mõju mingile kindlale objektile. Vihmasimulaatorit varustatakse veega Pipelife polüetüleentorustiku kaudu. Veeallikaks on katseruumi seinal asuv külmaveetoru. Varasemalt ehitatud vihmasimulaatorit tuli muuta, kuna üheks eesmärgiks oli nõlvakattematerjalide testimine intensiivsuse korral kuni 2,2 mm/min. Selleks valmistas töö autor uued vihmutiliinid, kasutades Pipelife polüetüleentorusid, ning juurde lisati kaheksa CoolNet Pro uduvihmuti düüsi. Eelnevalt oli vihmasimulaatoris kasutusel 26 vihmutit.



Joonis 3.2. Vihmasimulaatori skeem (Vagula 2018).

Hindamaks vihmasimulaatori korrapärast töötamist, on vaja välja selgitada tehisvihma ühtlus. Selleks viidi läbi katse, kus mõõtetopsid asetati korrapäraselt vihmutatavale alale

ning määrati topsides oleva vee mass. Seejärel leiti arvutustega (valem 3.1.) Christianseni ühtlase jaotuse koefitsient CU (*coefficient of uniformity*, %) (Christiansen 1941). Üldiselt võib rahuldavaks tehisevihma ühtluseks lugeda väärtust $CU > 80\%$ (Lora *et al.* 2016, Aksoy *et al.* 2012).

$$CU = 100 \cdot \left(1 - \frac{\sum |z-m|}{n \cdot m}\right), (3.1.)$$

kus CU on ühtlase jaotuse koefitsient %;

n – mõõtetopside arv;

m – mõõtetopside veemasside aritmeetiline keskmine g;

z – mõõtetopsides oleva veemassi hälve keskväärtuse (m) suhtes.

Töö raames viidi korduvalt läbi katseid selgitamaks, kui ühtlane tehisevihm on. Mõõtetopsidena kasutati plastmasskarpe (20 tk), mis paigutati malelaua skeemiga vihmutatava ala alla. Juurde lisatud kaheksast düüsis otsustati kaks sulgeda. Samuti muudeti suletud düüside asukohta korduvalt, kuna selle tulemusel paranes kunstvihma ühtlus. Ühtlase jaotuvuse katsete käigus saavutati eelpool mainitud metoodikat kasutades CU väärtusena tulemuseks 85% (tabel 3.1).

Tabel 3.1. Ühtlase jaotuse leidmise protokoll 3 minutilise katse korral

Karbi nr	7	6	5	4	3	2	1
Mass (g)	43,14	54,63	55,58	44,22	41,73	51,7	57,44
$z-m$	4,61	6,88	7,83	3,53	6,02	3,95	9,69
Karbi nr	20	19	18	17	16	15	-
Mass (g)	37,11	39,46	48,88	51,89	34,68	45,32	-
$z-m$	10,64	8,29	1,13	4,14	13,07	2,43	-
Karbi nr	14	13	12	11	10	9	8
Mass (g)	37,29	59,41	57,73	58,6	50,71	35,74	49,81
$z-m$	10,46	11,66	9,98	10,85	2,96	12,01	2,06
m	47,75g	-	$x(\sum z-m)$	142,18g	-	CU	85,12%

3.1.2. Katsetatavad vihmaintensiivsused

Käesolevas töös kasutatud nõlvakattematerjalide katsetused erosioonisimulaatoril viidi läbi järgmisel kolmel vihmaintensiivsusel:

- 0,5 mm/min – nõrk intensiivsus;
- 1,4 mm/min – keskmine intensiivsus;
- 2,2 mm/min – tugev intensiivsus.

Vihma intensiivsused leiti katseliselt. Selleks kaaluti katsetavatel nõlvustel kolme minuti jooksul tühjast nõlvakastist läbi дренаaži väljaviigu äravoolanud vee mass. Kõik mõõtmised sooritati piisava ajavahega, et väljavoolust äravoolava vee hulk oleks ühtlane. Vee mass teisendati ühikusse dm^3 , jagati nõlvakasti horisontaalprojektsiooni pindalaga (dm^2), mis oleneb nõlvakasti kaldest, ning korrutati sajaga, et saada väärtus millimeetrites. Tulemusena saadi kasti põhjas katse vältel olev tehisevihma kogus (P), mille abil arvutati vihmaintensiivsus kasutades valemit 2.1.

Nõrk- ja keskmine vihmaintensiivsus on saadud solenoidklappi kasutades. Solenoidklapiga saab katkestada vee pealevoolu süsteemi ning seeläbi muutub vihmaintensiivsus. Solenoidklappi reguleeritakse spetsiaalse kontrolleri abil, millega seadistatakse klapi tsükliline töörežiim, muutes klapi suletud-avatud aega. Nõrga ja keskmise intensiivsuse korral hoiti klappi avatud asendis 2,2 sekundit. Avatud asendi aeg leiti katseliselt, valitud väärtusega oli süsteemi töö kõige ühtlasem. Klapi suletud asendit reguleeriti – nõrga intensiivsuse korral jäi klapp suletuks 20,46 sekundiks ning keskmise intensiivsuse korral 7,16 sekundiks. Tugeva intensiivsuse korral oli solenoidklapp avatud režiimis ehk klappi ei kasutatud. Töö käigus tuli pidevalt fikseerida ja jälgida veearvesti näite, et veenduda kogu katseseeria ühtluses. Kasutatava ühisveevärgi vee tõttu kippusid vihmuti düüsid ummistuma: korduvalt tuli enne dokumenteeritud katsete algust düüse lahti võtta ning puhastada. Katsetulemuste koondtabelid, kus määrati intensiivsust, on välja toodud lisades (vt lisa 1).

3.1.3. Nõlvakast

Nõlvakast imiteerib teemulde konstruktsiooni, mille moodustavad:

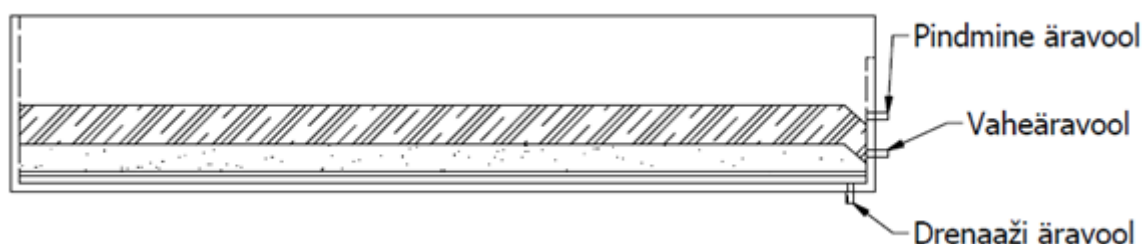
- vahetatav nõlvakattematerjal – umbes 10 cm kiht, milleks võib olla haljastusmuld, reoveesette kompost või reoveesette kompost liivaga;
- teemulde materjal – aluspinnast moodustav 10 cm drenliiva kiht;
- дренаažimatt – geokomposiit StabiDrain koos geotekstiil Typar SF 20-ga.

Kogu katsete perioodi vältel kasutati nõlvakastis alusmaterjalina ühte ja sama teemulde materjali koos geokomposiidiga. Pealmisi nn nõlvakattematerjale vahetati seitsmel korral.

Nõlvakattematerjale katsetati viiel erineval nõlvusel:

- 1:4 (va haljastusmuld);
- 1:3;
- 1:2,5;
- 1:2;
- 1:1,5.

Nõlvakastil on kolmel erineval tasapinnal väljaviigud (joonis 3.3) – pindmine äravool, vaheäravool, дренаaži äravool, kust on võimalik mõõta nõlvakastist läbivoolava vee kogust ning hinnata vee jaotust läbi kolme äravoolu. Pindmise äravoolu väljaviik jääb samale kõrgusele nõlvakattematerjali pindmise kihiga, vaheäravool asetseb vahetult drenliiva kohal ning дренаaži väljavool asetseb drenliiva all, geosünteesiga samal kõrgusel. Antud väljavoolude abil saab uurida ja võrrelda erinevate omadustega materjalide veejuhtimise võimet.



Joonis 3.3. Nõlvakasti väljaviigud kolmel erineval tasapinnal (Vagula 2018).

3.1.4. Katsete käik

Katsetatav nõlvakattematerjal lisati nõlvakasti aluspinnasele, umbes 10 cm kihina. Esmane toiming oli materjali laiali planeerimine jälgides, et kogu nõlv saaks kaetud ühtlase kihina. Materjali tihendati, patsutades nõlva kühvli abil. Seejärel alustati katsetatava nõlvakattematerjali märjaks kastmist maksimaalse vihmaintensiivsusega, nõlvakast oli seejuures algasendis ehk horisontaalses asendis. Märjaks kastmine sooritati ööpäev enne dokumenteeritud katsete algust, et imiteerida nõlva looduslikku küllastunud olekut. Kastmisele järgneval päeval hinnati visuaalselt nõlva tihedust. Vihmapiisad mõjuvad nõlvale tihendajana, vajaduse korral tihendati nõlva veelkord.

Uuesti materjali märjaks kastmine toimus enne katset seni, kuni äravoolud hakkasid tööle ning töötasid ajas ühtlaselt – tekkis n-ö *steady state* olukord. Ühtlase voolu (*steady state*) olukord tähendab, et katse käigus ei toimu enam pinnasekihtide veesisalduse muutust, mis mõjutaks sademetevee jagunemist pindmiseks-, vahe- ja drenaaživeeks. Nõlva veega küllastatud oleku saabudes, seadistati nõrk vihmaintensiivsus, kasutades solenoidklappi, ning nõlv reguleeriti nõlvusele 1:4. Oodati uuesti, kuni äravoolud ühtlustusid, ning alustati mõõtmistega. Katse käik oli järgmine:

- katse alguses pandi stopper tööle;
- 10. sekundil fikseeriti veearvesti algnäit;
- 15. sekundil asetati kaanetatud anumad nõlvakasti väljavoolude alla;
- 135. sekundil toimus anumate vahetus, eemaldatud anumad kaaluti ning dokumenteeriti vee mass grammides;
- 255. sekundil vahetati anumaid, toimus dokumenteerimine;
- 370. sekundil fikseeriti veearvesti lõppnäit;
- 375. sekundil eemaldati anum, dokumenteeriti ning katse lõppes.

Kunstvihm jäeti tööle, nõlv seadistati järgmisele katsetatavale nõlvusele 1:3 ning viidi läbi uus katse analoogselt ülal mainitule. Seda korrati kuni nõlvuseni 1:1,5.

Järgnevalt toimus taas nõlvakasti seadistamine nõlvusele 1:4 ning katsetama hakati keskmise vihmaintensiivsusega. Tegutseti sarnaselt ülal väljatoodule. Katsete vältel hinnati nõlvakattematerjalide käitumist. Iga katse lõpus kontrolliti veearvestist läbiminev veemaht (W_{6min}). See leiti, fikseerides veearvesti algnäidu ja lõppnäidu 6-minutilise perioodi jooksul. Lõppnäidust lahutati algnäit ning saadi fikseeritud aja jooksul läbi voolanud vee maht. See oli tarvilik, et veenduda katsete identsuses.

Iga nõlvakattematerjali ja vihmaintensiivsuse kombinatsiooni puhul viidi läbi eelpool mainitud tegevused.

3.1.5. Erosioonistendi veebilanss ja veahinnang

Kogu vihmasimulaatori tarbitud vesi ei jõua nõlvakasti, vaid osa sajab kastist mööda (Q_{kadu}), kuna nõlvakast on väiksem kui vihmutatav ala. Seega katse käigus veearvestist läbivoolav vooluhulk ($Q_{arvesti}$) ei jõua täielikult nõlvakasti. Lisaks sõltub kasti jõudev vesi (Q_{kast}) nõlva kaldenurgast. Tugeva vihmaintensiivsuse ja eri nõlvuste kombinatsioonil leiti veekadu:

$Q_{kadu} = Q_{arvesti} - Q_{kast}$. Kasti jõudev vesi leiti katseliselt, seega võib väärtus Q_{kast} varieeruda, kuna vihasimulaatoris moodustuv „vihmapilv“ on teatud määral juhuslik. Q_{kadu} väärtused on toodud lisades (vt lisa 1) ning määratud protsentuaalse kaona veearvesti näidust.

Katsetulemuste analüüsimisel (peatükk 4) võrreldakse kasti jõudva vooluhulga Q_{kast} jagunemist (valem 3.2) pindmiseks-, vahe- ja drenaažiäravooluks. Saadud andmete põhjal koostati vooluhulkade proportsionaalne veebilansi jaotus, mille iseloomustamiseks kasutatakse sektordiagramme.

$$Q_{kast} = Q_p + Q_{va} + Q_{dr} \pm Q_{viga} , (3.2.)$$

kus Q_{kast} nõlvakasti jõudev tegelik veekogus l/min;

Q_p – nõlvakasti pindmine äravool l/min;

Q_{va} – nõlvakasti vaheäravool l/min;

Q_{dr} – nõlvakasti drenaaži äravool l/min;

Q_{viga} – Q_{kasti} ja äravoolude (Q_p , Q_{va} , Q_{dr}) vahe l/min.

3.2. Nihketugevuste määramine

Nõlvade püsivuse ja stabiilsuse hindamiseks on oluline kindlaks teha nõlvamaterjalide vastupidavus nihkele. Selleks tuleb määrata materjalide nihketugevused. Nihketugevust iseloomustavad kaks olulist mehaanilist parameetrit – nidusus c ja sisehõõrdenurk φ (Gray, Sotir 1996). Nende näitajate määramiseks on enam kasutust leidnud Mohri-Coulomb'i tugevusteooria, mille järgi pinnase vastupidavus katkeb teatud nihke- ja normaalpingete kriitilise koosmõju toimet. Nihketugevused leitakse tuginedes valemile 3.3 (Reintam 2010).

$$\tau_f = c + \sigma \cdot \tan\varphi, (3.3.)$$

kus τ_f on nihketugevus;

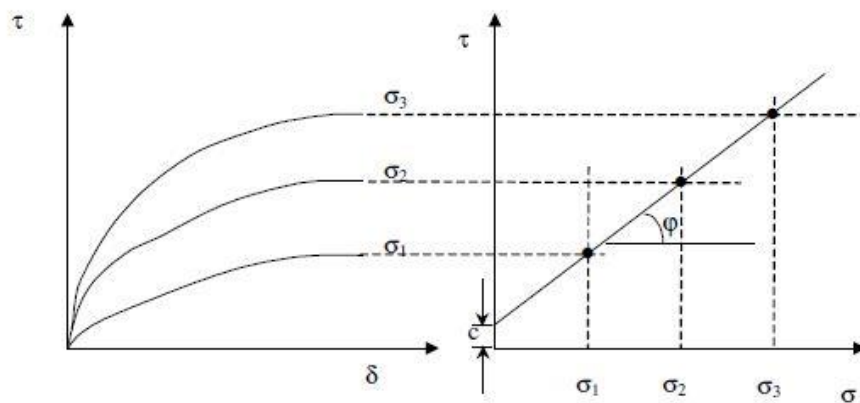
c – pinnase nidusus, kohesioon kPa;

σ – pinnast mõjutav normaalpinge kPa;

φ – pinnase sisehõõrdenurk °.

Pinnase tugevus määratakse laborkatse käigus lõiketeimi meetodiga. Teimimise käigus toimub katseseadmes karbis oleva proovikeha vertikaalsuunaline koormamine etteantud

koormusega P . Samal ajal rakendatakse proovikehale konstantse kiirusega horisontaalsuunalist koormust T . Koormus P loob proovikeha tasapinnal normaalpinge $\sigma = P/A$, kus A on karbis asuva proovikeha ristlõikepindala. Karbi kahe poole vahel olevas proovikehas tekib horisontaalkoormuse tagajärjel nihkepinge $\tau = T/A$, mis põhjustab fikseeritavat paigutust δ . Väikse horisontaalsihis oleva koormuse korral on δ ja τ vahel (joonis 3.4) lineaarne seos (Reintam 2010).



Joonis 3.4. Astmelise koormusega nihkepinge tulemused (Reintam 2010).

Samaväärne astmeline horisontaaljõu suurendamine tekitab δ kasvamist, kuni nihutatava karbipoole kestva libisemiseni. See on hetk, kui katsekeha tugevus on ammendunud ning selle põhjustanud nihkepinge on samaväärne katsetatava materjali nihketugevusega (Reintam 2010).

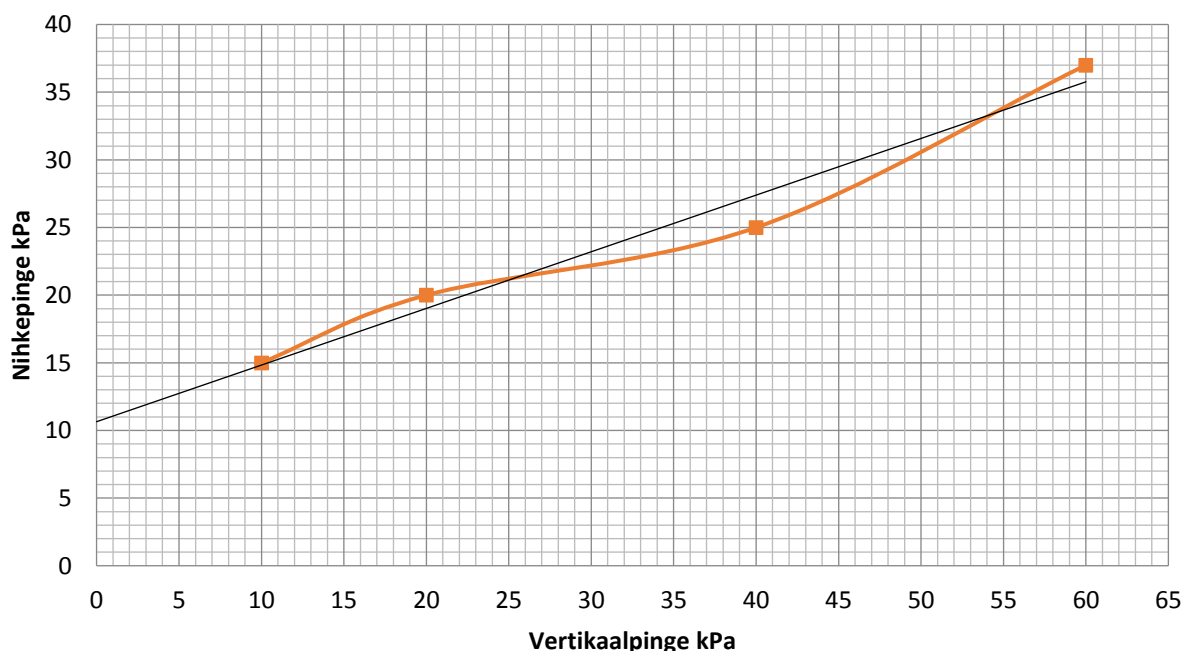
Käesolevas magistritöös määrati kasutatavate nõlvakattematerjalide tugevusparameetrid nidusus c ja sisehõordenurk φ . Selleks kasutati Eesti Maaülikooli põllumajandus- ja keskkonnainstituudi laboris asuvat Eijkelkampi otsese nihketugevuse määramise seadet. Laborkatseid juhendas professor Endla Reintam.

Enne seadmega katsetamist, tuli proovikehad ette valmistada. Selleks võeti kõigist kasutatud nõlvakattematerjalist neli proovi. Proovide võtmiseks kasutati spetsiaalseid lõikerõngaid läbimõõduga 100 mm ja kõrgusega 30 mm. Proovid võeti nõlvakastist, kui materjal oli puistena nõlva peale laotatud, ning kunstvihmaga tihendatud. Proovikehade alla kinnitati filterpaberid ning kehad asetati 24 tunniks veevanni. Veevannis toimub proovikehade veega küllastumine: tagatud on vee alt ülesse liikumine, kuid proovikehi ei uputata. Vesi tõuseb

proovikehas altpoolt ülespoole, lükates pinnases pooride vahelise õhu välja, ning seeläbi saavutatakse peaaegu täielik veega küllastatus.

Proovikeha paigaldati katseseadmesse kahe poorse metallplaadi vahele, kasutades spetsiaalset tõukurit. Seejärel alustati katsetusega. Katseseadet juhitakse läbi tarkvaraprogrammi, kus määratakse vertikaal- ja horisontaaljõud ning kiirused, mille juures nihutamine läbi viiakse. Koormused saavutatakse suruõhku rakendades. Igale kasutatavale nõlvakattematerjalile tehti neli teimimiskatset, rakendades normaalpingeid (σ) 10, 20, 40 ja 60 kPa. Üks katsekord kestis ca 40 min. Tulemuste usaldusväärsuse tagamiseks tehti kõiki teimimisi kaks korda. Saadud tulemuste põhjal koostati nihkediagrammid, kus vertikaaltelje moodustab nihkepinge ning horisontaaltelje vertikaalpinge. Diagrammidelt saadakse tugevusparameetrid c ja φ .

Näiteks Ettevõtte A sette tugevusparameetrite väärtuseks määrati nidususeks 11 kPa ning sisehõõrdenurgaks 25° (joonis 3.5). Saadud tulemuste nihkediagrammid on toodud lisades (vt lisa 2) ja tugevusparameetrid alajaotise 3.4. tabelis 3.7. Leitud parameetreid on võimalik kasutada näiteks erinevates modelleerimistarkvarades, kui soovitakse analüüsida, millised olukorrad võivad tekkida, kui kasutada käesolevaid pinnaseid.



Joonis 3.5. Ettevõtte A sette nihkediagramm.

3.3. Veejuhtivuse määramine

Pinnase veejuhtivusena ehk filtratsioonina käsitletakse olukorda, kui pinnasepooride vahel toimub vee liikumine raskusjõu, kapillaarjõu, rõhu või temperatuuride erinevuse tõttu (Jaanisoo 2011). Vee liikumist mõjutavad: pinnaseosakeste mõõtmed, osakeste paiknemine, pinnase lõimis, pinnase tihedus ja pinnase mineraalne koostis (Astover *et al.* 2012). Filtratsioonimoodul on pinnase mehaaniline parameeter, mis iseloomustab veejuhtivust ning mida mõõdetakse kiirusdimensiooni ühikutes (Keskkonnasõnaraamat 2004 s.v. filtratsioonimoodul).

Käesolevas töös sooritati katsed filtratsioonimooduli määramiseks, need tehti kasutatavatele nõlvakattematerjalidele, reoveesette segamiseks kasutatud mineraalliivale ja kasutatavale aluspinnasele. Katsed teostati Eesti Maaülikoolis vesiehituse ja veekaitse osakonna laboris D170. Töö sooritamiseks kasutati KSAT seadeldist (joonis 3.6), mis meetoodiliselt põhineb Darcy seadusele. Seadme tarkvara kasutab uuritava materjali veejuhtivuse leidmiseks valemit 3.4. (Meter Group 2019).

$$K_S = -\frac{L \cdot V}{H \cdot A \cdot t}, \quad (3.4.)$$

kus K_s on materjali veejuhtivus

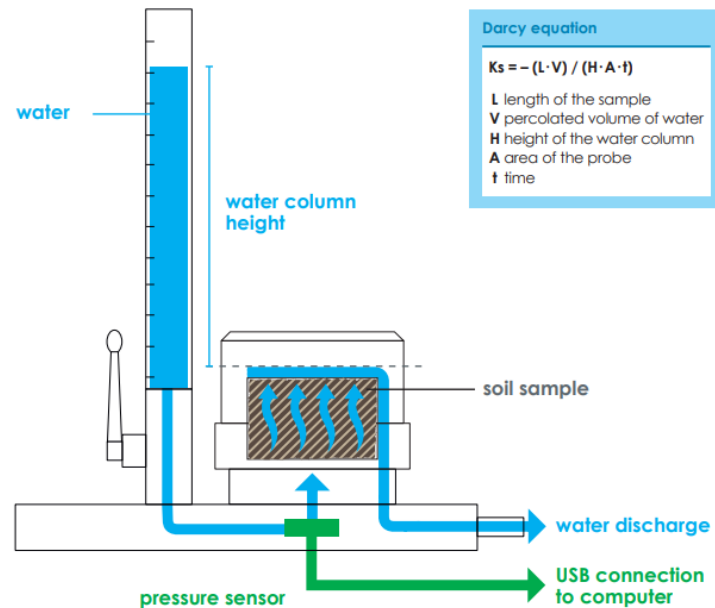
L – katsekeha kõrgus metallrõngas cm;

V – katsekehast läbijooksnud vee maht cm^3 ;

H – veesamba kõrgus cm;

A – katsekeha ristlõike pindala cm^2 ;

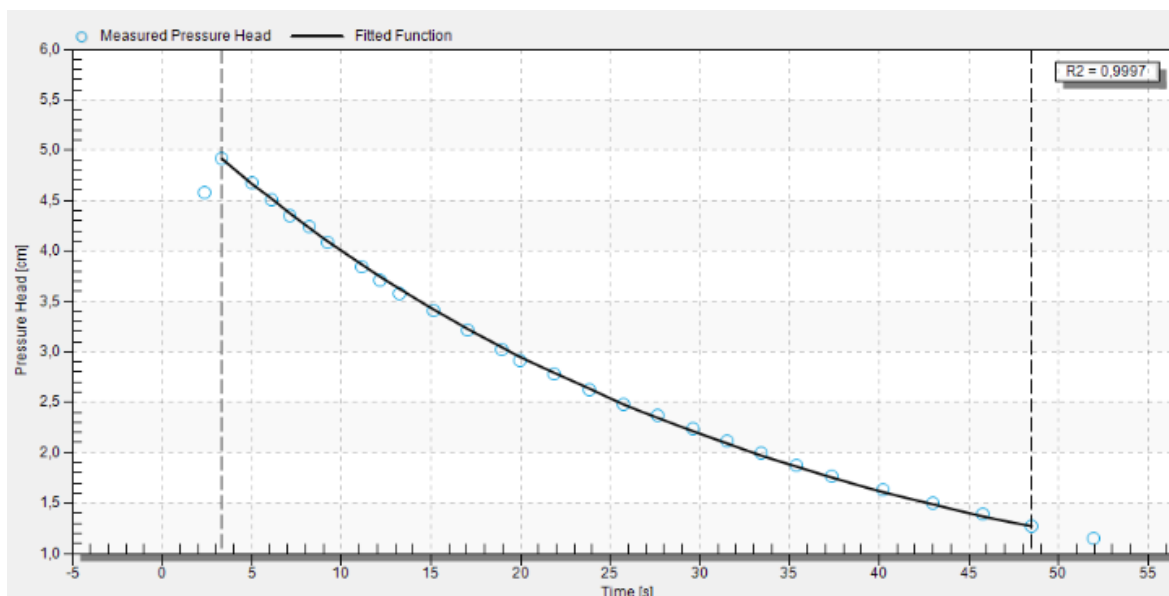
t – aeg s.



Joonis 3.6. KSAT seade veejuhtivuse määramiseks (Meter Group 2019).

Enne katsete läbiviimist tuli proovikehad ette valmistada analoogiliselt nagu tehti nihketugevuste määramisel. Katsekehad asetati metallrõngastesse läbimõõduga 80 mm ja kõrgusega 50 mm. Proovikehade võtmisel tuli jälgida, et pinnase sisse ning pinnase ja rõnga vahele ei jääks tühimikke. Samuti tuli veenduda, et katsekeha sisse ei jääks üleliigseid tahkiseid (puutükid, kivid), mida nõlvakattematerjalid võivad sisaldada. Pärast 24 tundi vee sees küllastumist alustati katsetega. Seadmega töötamisel tugineti kasutusjuhendile (Meter Group 2019). Esmalt tuli kalibreerida katseseadme nullpunkt. Seejärel valiti tarkvarast sobiv programm (*falling head technique*). Tarkvara arvutab pinnase veeläbilaskvuse katse ajal oleva temperatuuri korral ning teisendab väärtuse 10°C jaoks. Lisaks kuvatakse graafik (joonis 3.7), mis iseloomustab rõhukao muutumist ajas. Pärast filtratsioonimooduli määramist pinnased kaaluti ning paigutati kuivatuskappi 105°C juurde kuivama, et määrata pinnaste veesisaldused.

Kokku määrati veeläbilaskvust 55 korral. Korduste tegemine oli vajalik selleks, et saada usaldusväärne tulemus. Katsetatavad pinnased on oma olemuselt väga heterogeensed, mistõttu on parameetrite väärtused väga muutuvad. Tulemus aktsepteeriti, kui samal materjalil saadi eri proovikehadest sarnane tulemus vähemalt kolmel korral. Erinevast vee läbilaskvusvõimest tingituna oli katse kestvus varieeruv, ulatudes 45 sekundist kuni 20 minutini.



Joonis 3.7. Aluspinnase veejuhtivuse määramine.

Katsete tulemused on välja toodud alajaotises 3.4 asuvas tabelis 3.6.

3.4. Kasutatavad materjalid

Käesolevas magistritöös on kasutatud seitset erinevat nõlvakattematerjali ning ühte aluspinnast (dreenliiv). Nõlvakattematerjalideks on reoveepuhastitest saadud reoveesetekompostid, reoveesetekomposti segu liivaga ja haljastusmuld. Reoveesetet sisaldavate materjalide nimetused on välja toodud tabelis 3.2.

Tabel 3.2. Reoveesette-põhised nõlvakattematerjalid

Tähistus	Stabiliseerimise meetod	Tugiained
Ettevõtte A sete	anaeroobne kääritus	turvas
Ettevõtte A sete+liiv	anaeroobne kääritus	turvas, liiv
Ettevõtte B sete	aunkompostimine	puitmaterjal, purustatud põhk
Ettevõtte B sete+liiv	aunkompostimine	puitmaterjal, purustatud põhk, liiv
Ettevõtte C sete 1	aunkompostimine	turvas, põhk
Ettevõtte C sete 2	aunkompostimine	põhk

Vastavalt infole Ettevõtte A kodulehel lisatakse stabiliseeritud reoveesettele freesturvast mahulises vahekorras 1:0,7. Seejärel jäetakse settekompost kuni aastaks aunadesse täiendavalt järeltöötlemale. Aunasid segatakse selle perioodi juures 4-6 korda. Ettevõttelt B saadud info kohaselt valmistatakse aunkompost 50 kopataiest tahendatud reoveesettest ja 20 kopataiest puukoorest, juurde lisatakse 15 põhurulli. Komposti segatakse regulaarselt kolm kuud, esimesel kuul kaks korda nädalas, teistel kuudel kord nädalas. Hiljem jäetakse aun järelvalmimisse 1-2 aastaks. Ettevõttelt C saadud informatsiooni kohaselt kasutatakse sette 1 valmistamiseks 90% reoveesetet (kuivainena), 9% turvast ning 1% põhku. Sette 2 valmistamiseks kasutati üks osa põhku ning kümme osa setet.

Ettevõtte A ja ettevõtte B setted tarnis vee-ettevõtte Eesti Maaülikoolis asuvasse katsepaika. Haljastusmulla ja aluspinnasena kasutatava drenliiva tõi käesoleva töö autor Tallinn-Tartu maantee Valmaotsa-Kärevere 2+1 möödasõidulade objektilt. Ettevõtte C mõlemad setted tõi töö autor vee-ettevõttest. Ettevõtete nimistu on toodud lisades (vt lisa 9). Settekompostisegu liivaga valmistas töö autor, segades sette loodusliku mineraalse liivaga (seguliiv) 50/50 massiprotsendi põhimõttest lähtuvalt – üks osa sette massi, üks osa liiva massi.

3.4.1. Orgaanilise aine sisalduse määramine

Kasutatavate nõlvakattematerjalidele määrati Eesti Maaülikooli põllumajandus- ja keskkonnainstituudi laboris orgaanilise aine sisaldus (tabel 3.3). Määramise viis läbi Kaja Orupõld. Esmalt määrati materjalide kuivaine sisaldus, kuivatades proove 105°C juures. Seejärel rakendati proovikehadele temperatuur 550°C, mille juures orgaanika hävineb ning põletuskaona leiti protsentuaalselt orgaanilise aine sisaldus kuivaine sisaldusest.

Tabel 3.3. Kasutatavate nõlvakattematerjalide orgaanilise aine sisaldus

Nõlvakattematerjal	Kuivaine sisaldus %	Orgaanilise aine sisaldus %
Haljastusmuld	78,17	8,04
Ettevõtte A sete	62,68	42,64
Ettevõtte A sete+liiv	93,91	15,49
Ettevõtte B sete	59,49	42,02
Ettevõtte B sete+liiv	91,49	14,15
Ettevõtte C sete 1	44,46	48,17
Ettevõtte C sete 2	31,52	54,54

Maanteeameti haljastustööde juhises on välja toodud minimaalne nõutav nõlvakattematerjali orgaanilise aine sisaldus 8-12%. Sisaldus oleneb kas rajatakse I, II või III klassi muru (Maanteeamet 2018).

3.4.2. Materjalide lõimise määramine

Aluspinnasele ning reoveesette segamiseks kasutatud liivale koostati Eesti Maaülikooli põllumajandus- ja keskkonnainstituudi mullaosakonnas laborant Raja Kähriku poolt granulomeetiline analüüs. Selle tulemusel määratakse pinnase koostis ehk lõimis, mis iseloomustab pinnases olevate erisuurusega osakeste suhtelist hulka (Astover *et al.* 2012). Lõimis määrati sõelanalüüsi katse käigus. Selleks kasutatakse erineva avasuurusega sõelu. Igale sõelale jääb teatud kogus pinnast, mille põhjal määratakse eri fraktsioonide osakaalu hulk pinnases (Leppik 2012). Tulemuste põhjal koostati aluspinnasele (tabel 3.4) ja seguliivale tabelid (tabel 3.5), kus on välja toodud fraktsioonid ning nende osakaal protsendina.

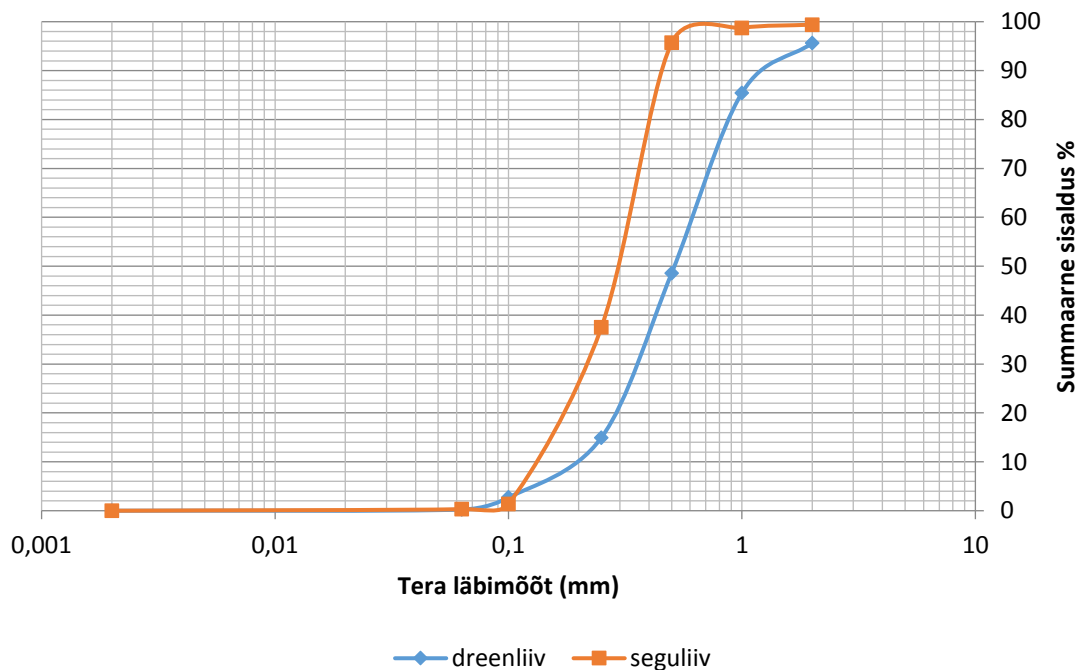
Tabel 3.4. Aluspinnase sõelanalüüsi tulemused

Sõela number	Fraktsioonid mm %		Fraktsioonide summa %	
			Jääk sõelal	Läbi sõela
2	2	4,4	4,4	95,6
1	1	10,2	14,6	85,4
0,5	0,5	36,9	51,4	48,6
0,25	0,25	33,7	85,1	14,9
0,1	0,1	12,2	97,3	2,7
0,063	0,063	2,5	99,8	0,2
<0,063	0,002	0,2	100,0	0,0

Tabel 3.5. Seguliiva sõelanalüüsi tulemused

Sõela number	Fraktsioonid mm %		Fraktsioonide summa %	
			Jääk sõelal	Läbi sõela
2	2	0,6	0,6	99,4
1	1	0,7	1,3	98,7
0,5	0,5	3,1	4,3	95,7
0,25	0,25	58,2	62,5	37,5
0,1	0,1	36,1	98,6	1,4
0,063	0,063	1,1	99,7	0,3
<0,063	0,002	0,3	100,0	0,0

Tabelites olevate andmete põhjal koostati graafik: horisontaalteljel kuvatakse logaritmi teraosakeste läbimõõdust ning vertikaalteljel vastavast avasuurusest läbi läinud pinnaseosakeste massi suhe kogumassi protsentides (Jaanisoo 2011). Ühendades graafikul vastavad punktid, saadi materjale iseloomustav sõelkõver (joonis 3.8). Fraktsioonide protsentuaalse sisalduse põhjal on mõlema materjali puhul tegu liivaga (Astover *et al.* 2012).



Joonis 3.8. Dreenliiva ja seguliiva sõelkõver.

3.4.3. Materjalide tunnusomaduste määramine

Käesolevas töös määrati kasutatavate materjalide tunnusomadused katseliselt labortingimustes ehk teimides, kasutades selleks silinderristlõikega terava äärega metallrõngaid. Tunnusomadused leiti samadele proovikehadele, mida kasutati materjalide mehaaniliste ja hüdrofüüsikaliste omaduste väljaselgitamiseks (alajaotises 3.2. ja 3.3.).

Pinnase veesisalduseks nimetatakse pinnaspoorides leiduva veemassi suhet protsentides pinnase kuivmassi (Leppik 2012). Veega küllastunud pinnas kaalutakse ning paigaldatakse kuivatuskappi, mille temperatuur peab olema 105°C. Sellel temperatuuril eraldub pinnasest vaba ning seotud vesi. Pinnast kuivatatakse kuni tema mass ajas enam ei muutu – see näitab kogu vee eraldumist pinnasest. Kõrgema temperatuuri korral on oht, et pinnase mass võib hakata vähenema orgaanilise aine sisalduse arvelt. Veesisaldus leitakse valemiga 3.5 (*Ibid.*).

$$w = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100, (3.5.)$$

kus w on pinnase kaaluline veesisaldus %;

m_w – pinnase mass enne kuivatamist g;

m_0 – kuiva pinnase mass g.

Küllastunud lasuvustiheduse määramiseks peab proovikeha hoidma 24 tundi vees. Selle aja jooksul lükatakse alt tuleva vee toimel pinnasepooridest õhk ning poorid täituvad veega.

Küllastunud lasuvustihedus määratakse valemiga 3.6 (Ritzema 1994).

$$Dm_w = \frac{(m_s + m_w)}{V}, (3.6.)$$

kus Dm_w on pinnase küllastunud lasuvustihedus g/cm³;

m_s – pinnases oleva kuiva osa mass g;

m_w – pinnases oleva vee mass g;

V – lõikerõnga maht cm³.

Proovikehale määratakse lasuvustihedus valemiga 3.7 (Ritzema 1994). Selleks leitakse absoluutkuiva pinnase mass kuivatamisel temperatuuri 105°C korral.

$$Dm = \frac{m_s}{V}, (3.7.)$$

kus Dm on pinnase lasuvustihedus g/cm³;

m_s – pinnases oleva kuiva osa mass g;

V – lõikerõnga maht cm³.

Poorsus on oluline füüsikaline suurus – sellest sõltub, kui kiirelt võib vesi pinnasesse tungida ning milline on pinnase veehoiuvõime (Astover *et al.* 2012). Vett hästi läbilaskvad pinnased võivad olla väikese poorsusteguriga ning vett halvasti juhtivad pinnased suure väärtusega. Poorsustegur iseloomustab pooride suuruse jaotust (Ritzema 1994). Poorsus leitakse valemiga 3.8 (*Ibid.*).

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{Dm}{\rho_s} \right), (3.8.)$$

kus ε on poorsustegur;

Dm – pinnase lasuvustihedus g/cm^3

ρ_s – kõvade osakeste keskmine tihedus pinnases (arvestatakse $2,66 \text{ g/cm}^3$).

Materjalide tunnusomadused arvutati kasutades ülaltoodud valemeid ning tulemused on koondatud koos alajaotises 3.3. käsitletud veeläbilaskvus parameetritega allolevasse tabelisse (tabel 3.6). Vastav parameeter materjali iseloomustamiseks saadi, kui võeti keskmine väärtust kolmest katsetulemusest.

Ettevõtte C sete 2 kohta on esitatud kaks väärtust: (a) ja (b). Variant “a” korral on materjal võetud puistena nõlvalt ning proovikeha ei tihendatud katse jaoks ettevalmistamisel. Proovikehasid tihendati selleks, et rõnga ja materjali vahele ei jääks tühimikke, kust vesi saaks lihtsamalt liikuda. Käesoleva nõlvakattmaterjali moodustavad põhuosakesed soodustavad materjali koredust – proovikeha oli õhuline. Variant “b” korral võeti materjal nõlvakastist, pärast korduvat vihmutamist. Samuti proovikeha ettevalmistamisel tihendati materjali, et vältida tühimikke rõnga ja pinnase vahel.

Tabel 3.6. Kasutatud materjalide tunnusomadused ja veejuhtivus

Materjali nimetus	Lõikerõnga maht cm ³	Silinder g	Märgmass g	Kuivmass g	Kaaluline veesisaldus w %	Pinnase küllastunud lasuvustihedus Dm _w g/cm ³	Pinnase lasuvustihedus Dm g/cm ³	Poorsustegur ε	Veeläbilaskvus Ks 10°C cm/d	Veeläbilaskvus Ks 10°C m/s
Dreenliiv	251,33	187,40	508,63	424,97	20	2,02	1,69	0,36	1168	1,36·10 ⁻⁴
Seguliiv	251,33	188,00	487,27	399,77	22	1,94	1,59	0,40	531,67	6,18·10 ⁻⁵
Haljastusmuld	251,33	192,77	408,93	281,60	45	1,63	1,12	0,58	0,37	3,96·10 ⁻⁸
Ettevõtte A sete	251,33	188,10	283,63	66,43	327	1,13	0,26	0,90	0,20	2,14·10 ⁻⁸
Ettevõtte A sete+liiv	251,33	194,40	407,90	276,70	47	1,62	1,10	0,59	39,33	4,62·10 ⁻⁶
Ettevõtte B sete	251,33	195,65	311,75	137,45	139	1,24	0,55	0,79	0,65	7,61·10 ⁻⁸
Ettevõtte B sete+liiv	251,33	193,33	397,70	276,07	44	1,58	1,10	0,59	113,00	1,31·10 ⁻⁵
Ettevõtte C sete 1	251,33	191,10	300,17	128,00	135	1,19	0,51	0,81	0,63	7,09·10 ⁻⁸
Ettevõtte C sete 2 (a)	251,33	177,70	280,20	78,10	259	1,11	0,31	0,88	93,00	1,08·10 ⁻⁵
Ettevõtte C sete 2 (b)	251,33	195,65	296,35	100,50	195	1,18	0,40	0,85	0,06	6,14·10 ⁻⁹

Tabel 3.7. Kasutavate nõlvakattematerjalide mehaanilised parameetrid

Parameeter	Haljastusmuld	Ettevõtte A sete	Ettevõtte A sete+liiv	Ettevõtte B sete	Ettevõtte B sete+liiv	Ettevõtte C sete 1	Ettevõtte C sete 2
Sisehõõrdenurk φ	38°	25°	35°	49°	40°	10°	17°
Nidusus c	4,5 kPa	11 kPa	12 kPa	9,5 kPa	9 kPa	9 kPa	13 kPa
Kaaluline veesisaldus w	37%	175%	60%	119%	52%	172%	228%
Pinnase lasuvustihedus Dm	1,41 g/cm ³	0,47 g/cm ³	1,04 g/cm ³	0,61 g/cm ³	1,11 g/cm ³	0,46 g/cm ³	0,35 g/cm ³

4. KATSETULEMUSED EROSIOONISIMULAATORIL

Erosioonisimulaatoriga läbi viidud katsetustel hinnati kasutatavate materjalide käitumist kolmel vihmaintensiivsusel ja nõlvuste: 1:4, 1:3, 1:2,5, 1:2, 1:1,5 korral. Fikseeriti äravoolumahud mööda pindmist-, vahe- ja drenaažiäravoolu. Saadud tulemuste põhjal koostati veebilanssi iseloomustavad sektordiagrammid, kuhu koondati kõik kasutatavad nõlvakattematerjalid rakendatavate vihmaintensiivsuste ning nõlvuste kaupa. Käesoleva töö käigus hinnati katsenõlvalt erosiooni toimet eemalduvate pinnaseosakeste kogust ja välimust visuaalse vaatluse teel. Uuriti ning võrreldi omavahel eri nõlvakattematerjalide äravoolavat vett. Katsekorralduse kirjeldus on välja toodud alajaotises 3.1.4.

Aluspinnaseks kasutatud drenliiva vihmutamisel horisontaalses asendis ei täheldatud kordagi pindmise äravoolu ega pinnapealsete lombikeste teket. Isegi kõige järsemal nõlvusel (1:1,5) tugeva vihmaintensiivsuse korral ei tekkinud kordagi vee voolamist mööda pinda, vaid kogu tehisvihmast põhjustatud vesi suutis infiltreeruda. Tegemist on vett hästi läbilaskva materjaliga.

4.1. Haljastusmuld

Esimene katsetatav materjal oli haljastusmuld. Nõlvakasti paigaldati umbes 10 cm haljastusmulla kiht. Teetöödega tegelevad ettevõtted kasutavad haljastustöödeks sõelutud mulda. Käesoleva materjali hankimise ajaks oli objektil valdavalt haljastustööd lõppenud. Tööde lõpus koondati kogu kasutatav materjal kokku, mistõttu käesolevas materjalis esineb mingil määral võõrseid (eri läbimõõduga kive). Haljastusmulla nõrga intensiivsusega vihmutamisel tekkisid nõlvakattematerjali pinnale koheselt veelombikesed, mis saju käigus kasvasid, ning tekkis pindmine äravool. Pindmine äravool suurenes koos vihmaintensiivsuse tõusuga. Vaheäravoolu ei tekkinud ning drenaaži osakaal oli väike.

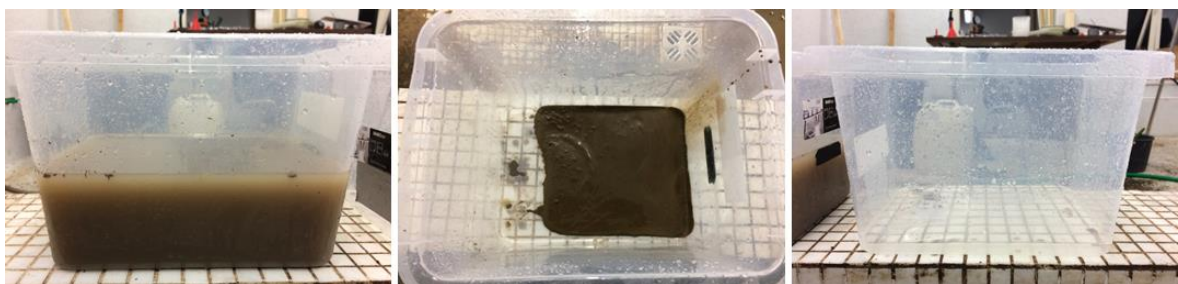
Pindmine äravool haaras endaga kaasa pisikese fraktsiooniga mullaosakesi. Nõrga intensiivsuse korral ei olnud väljakanduvate pinnaseosakeste kogus suur. Ärakanduva sette hulk mõõtanumates suurenes keskmise vihmaintensiivsuse kasutamisel alates nõlvusest 1:2,5. Samuti hakkas katsete vältel nõlvakattematerjali pinnalt välja paistma erineva

suurusega kive (joonis 4.1). Koos mullaosakeste ärakandumisega hakkas nõlva pinnalt paistma heledamaid saviosakesi. Enim materjali nõlva pinnalt kanti tugeva intensiivsuse korral ning alates nõlvusest 1:2.



Joonis 4.1. Pealtvaade haljastusmullale nõrga vihmaintensiivsuse korral nõlvusel 1:2 (autori foto).

Mööda haljastusmulla pinda voolav vesi oli visuaalselt hinnates pruunika värvusega. Vee pinnal oli mõningal määral näha taimjäänuseid. Mõõtanuma põhjas esines setet, mis sattus pindmise äravoolu toimel katsenõlvalt minema (joonis 4.2). Sete on väga vedel ning pruunika värvusega. Drenaaži äravoolust kogutud vesi on visuaalselt hinnates valdavalt läbipaistev, vesi ei sisalda pinnaseosakesi.



Joonis 4.2. Vesi haljastusmulla pindmisest äravoolust (vasakul), välja settinud pinnaseosakesed (keskel) ning vesi drenaaži äravoolust (paremal) (autori foto).

4.2. Ettevõtte A sete, ettevõtte A sete+liiv

Ettevõtte A sete

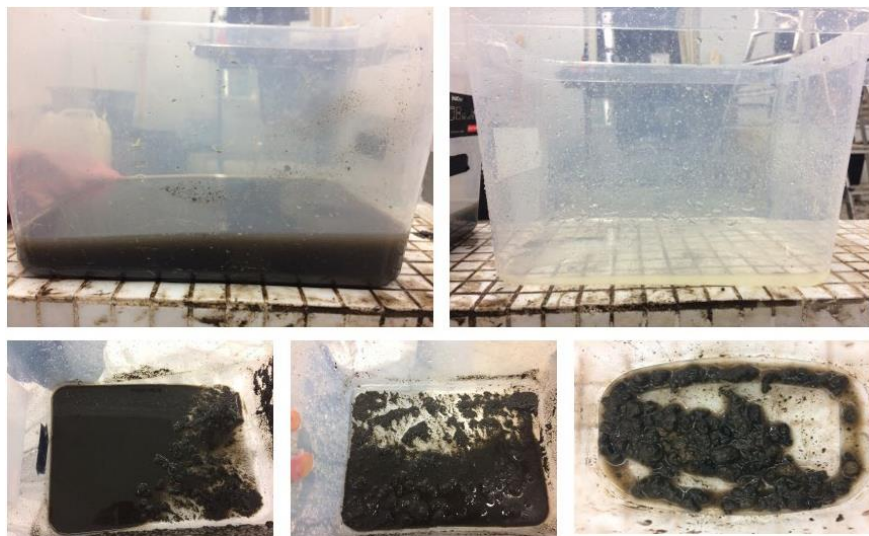
Anaeroobselt kääritatud settekompost koosneb mittehomoogeensetest erineva suurusega tükikestest (joonis 4.3). Nõlvakattematerjali nõlvale paigaldades on tunda spetsiifilist haisu. Nõrga intensiivsusega vihma korral tekivad pinnale lombikesed ning juurde sadav vihmavesi tekitab pindmist äravoolu, sarnaselt nagu toimus haljastusmulla puhul. Vaheäravool ei hakanud kordagi tööle. Drenaaž käitus analoogselt haljastusmullaga.

Pindmine äravool kannab kaasa materjali, mis visuaalsel vaatlusel näib omavahel kokkukleepunud terakestena. Nõlva pind paistab olevat kare, pinnaseosakeste nihkumine on raskem, kui haljastusmulla korral. Keskmise vihmaintensiivsuse ning kõige järsema nõlvuse korral paiskavad vihmapiisad ümbritsevat pinnast eemale, tekitades seeläbi pinnale väikesed augud, mis täituvad veega. Lombid aeglustavad mõneks ajaks pindmist äravoolu. Tugeva intensiivsuse korral, alates nõlvusest 1:2, toimub pinnaseosakeste massilisem ärakanne. Nõlva pinnalt tulev materjal ummistab pindmise äravoolu väljaviike ning kuna äravool tuli vabastada, korraldi katset mitu korda.

Pindmise äravoolu vesi oli musta värvi – tumedam kui haljastusmulla korral. Drenaaži äravoolust tulev vesi seevastu oli kollakas. Käesolevat nõlvakattematerjali iseloomustab rohke pinnaseosakeste ärakandumine. Antud materjali puhul transporditi erosiooniprotsessi käigus teiste kasutatavate nõlvakattematerjalidega võrreldes enim nõlva minema. Ärakantavad setteosakesed (joonis 4.4) olid kordades suuremad kui haljastusmullaga kaetud nõlva korral.



Joonis 4.3. Ettevõtte A sete puistena (vasakul), nõlv nõrga- ja tugeva vihmaintensiivsuse korral (autori foto).



Joonis 4.4. Üleval: ettevõtte A pindmise ja drenaaziäravoolu vesi. All: välja settinud materjali osakesed (autori foto).

Ettevõtte A sete+liiv

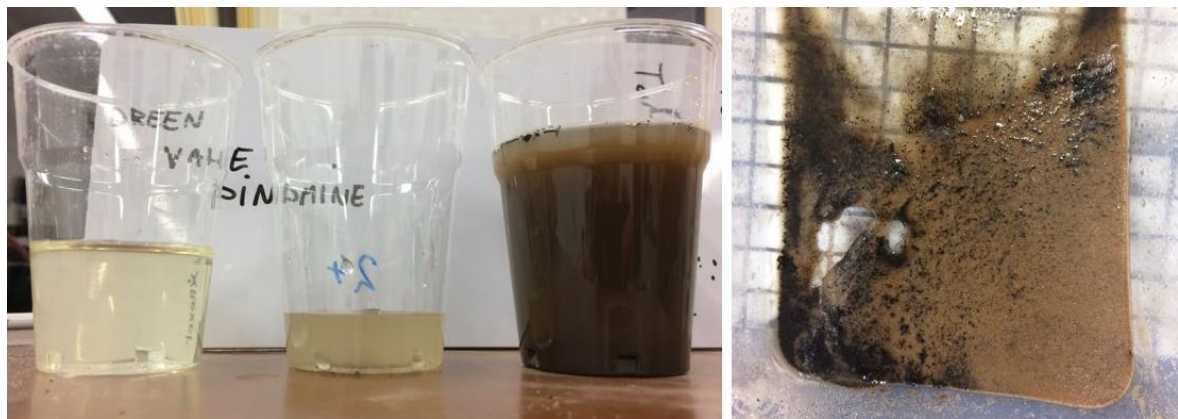
Anaeroobselt käideldud sete segatuna mineraalliivaga (joonis 4.5) käitus analoogselt puhta sette variandiga. Pindmine äravool hakkas tööle juba nõrga sademete intensiivsuse korral. Sajuvee tõttu hakkas nõlval toimuma liiva ärakanne juba alates nõlvusest 1:2. Vaheäravool töötas minimaalselt, mitte väga intensiivselt. Erinevalt haljastusmullast, mille puhul eraldus

peenikest fraktsiooni, olid pinnaseosakesed siinse settesegu puhul kujukindlamad ja püsisid rohkem koos.



Joonis 4.5. Ettevõtte A sete+liiv. Vasakult: puistena, tihendatult, keskmise intensiivsusega saju korral (autori foto).

Väljavooludest tulev vesi (joonis 4.6) oli hinnanguliselt heledam, kui puhta sette kasutamisel. Dreeni väljavool on heledam, kui ainult sette korral, kuid siiski haljastusmullast tumedam. Sademetest põhjustatud erosiooni toimetel transporditakse nõlvalt suures mahus liivaosakesi minema, mis moodustavad suure osakaalu sette osast.



Joonis 4.6. Ettevõtte A sete+liiv väljavoolude vesi (vasakult): dreenaar, vaheäravool, pindmine äravool. Paremal sete (autori foto).

4.3. Ettevõtte B sete, ettevõtte B sete+liiv

Ettevõtte B sete

Ettevõtte B sete, milleks oli aunkompost (joonis 4.7), sarnanes visuaalselt ning struktuurilt traditsioonilisele haljastusmullale. Komposti katsenõlvale paigaldades paistis esile rohke puitmaterjali osakaal – käesoleva sette tugiaineks on puitmaterjal. Nõlvakattematerjali käideldes ei olnud tunda spetsiifilist lõhna.

Materjal püsis nõlval hästi. Tegu oli nõlvakattematerjaliga, mille korral esines kõige vähem erosioonist põhjustatud pinnaseosakeste ärakandumist katsenõlvalt. Tugeva vihmaintensiivsuse korral ning alates nõlvusest 1:2 siiski esines erosiooni, kuid ära kanduvate osakeste hulk jäi alla nii haljastusmullale, kui ka anaeroobselt kääritatud settekompostile.



Joonis 4.7. Ettevõtte B reoveesettest nõlvakate, vasakult: puistena nõlval, vihmakorral, pärast vihmasadu (autori foto).

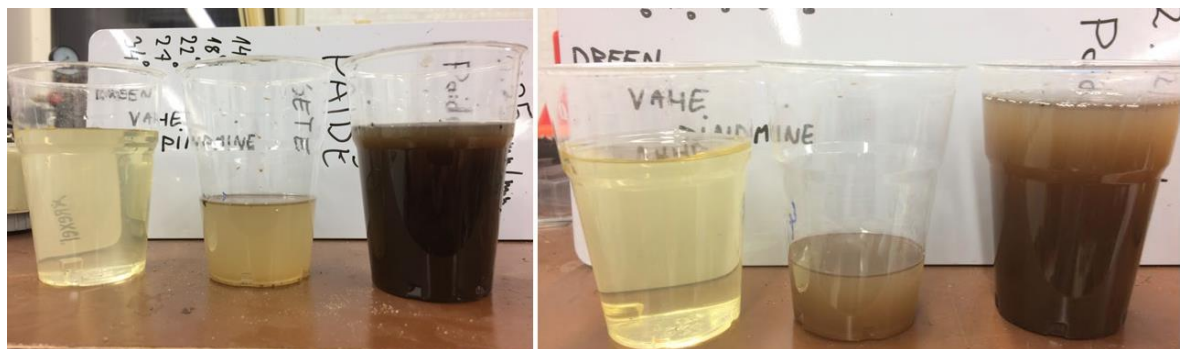
Ettevõtte B sete+liiv

Ettevõtte B aunkomposti segu liivaga (joonis 4.8) korral esines vaheäravoolu. Sademete mõjul erodeerub pinnaselt valdavalt liivaosakesi. Nõlva pinnalt paistab silma rohke puitmaterjali osakaal.



Joonis 4.8. Ettevõtte B sete+liiv reoveesetest nõlvakate (autori foto).

Liiva osakaal nõlvakatematerjalis mõjutab pindmise äravoolu värvust (joonis 4.9). Drenaaži äravoolu värvus oli kasutataval settel analoogne ettevõtte A settega. Pindmise äravoolu sette tumedam värvus võib olla tingitud sellest, et ilma liivata kattes on reoveesette osakeste hulk suurem.



Joonis 4.9. Ettevõtte B sete nõlvakatematerjali väljavoolud: drenaaž, vaheäravool, pindmine äravool (parempoolne pilt sete+liiv korral) (autori foto).

4.4. Ettevõtte C sete 1, ettevõtte C sete 2

Ettevõtte C sete 1

Ettevõtte C aunkompost (joonis 4.10), millele tugiaineteks on lisatud turvast ja põhku, sarnaneb välimuselt mõningal määral anaeroobselt kääritatud kompostile. Käesolev materjal ei sisalda suure fraktsiooniga pinnaseosakesi, samuti puudub spetsiifiline hais.

Materjali algselt vihmutades ei teki katte pinnale kohehelt lombikesi, nagu näiteks juhtus ettevõtte A setetega. Osa vihmaveest nõrgub läbi nõlvakatte ning jõuab teemuldeni. Nõlvuse järsenemine toob kaasa pindmise äravoolu suurenemise.



Joonis 4.10. Ettevõtte C sete 1 aunkompost (autori foto).

Antud materjal sarnaneb äravooludest määratud vee värvuste (joonis 4.11), kui ka settinud osakeste poolest, anaeroobselt kääritatud settekompostist valmistatud nõlvakattematerjalile.



Joonis 4.11. Ettevõtte C sete 1 nõlvakattematerjali äravoolud: дренаž, vaheäravool, pindmine äravool. Paremal setteosakeste suurus (autori foto).

Ettevõtte C sete 2

Aunkompost, mille tugiaineks oli ainult põhk, erines oluliselt oma pinnaseomadustelt ning tehisvihma käes käitumiselt teistest nõlvakattematerjalidest. Katsenõlvale materjali paigaldades tundus, et tegu on väga kerge ja õhulise nõlvakattega. Käesolev nõlvakattematerjal on spetsiifilise lõhnaga ning ei sisalda üleliia tahkiseid. Märjaks kastmise ajal juhib nõlvakattematerjal enamuse sademeteveest läbi katte (joonis 4.12) ning vesi liigub mööda drenaaži äravoolu nõlvast minema.

Väikese intensiivsuse korral ei teki nõlvale veelombikesi, mille suurenedes hakkaks toimuma pindmine äravool, nagu juhtus teiste kasutatavate materjalide puhul. Nõlvusel 1:2,5 ei toimu materjali ärakannet, vaheäravool hakkab intensiivsemalt tööle kõige järsema nõlvuse korral.

Keskmise intensiivsuse korral on visuaalselt näha, kuidas vihmapiiskade langedes, kineetilise energia tõttu, tekivad pinnale väikesed lohukesed. Lohkude põhjas olevat vett on näha, kuid lohud ei täitu, kuna vesi jõuab ära infiltreeruda. Materjali veeläbilaskvus halvenes ajaga, kuna vihmapiisad mõjusid materjalile tihendajana ning seeläbi vähenes nõlvakattematerjali õhustatus.



Joonis 4.12. Aunkompostmaterjal, tugiainenena kasutatud põhku (autori foto).

Keskmise vihmaintensiivsuse korral ning nõlvuse 1:1,5 juures on märgata erosiooni tõttu katsenõlvalt väljakantavat materjali. Võrreldes teiste nõlvakattematerjalidega ei ole väljakantava pinnase osa märkimisväärne. Nõrga intensiivsuse korral drenaažist äravoolav vesi (joonis 4.13) on kollakam, kui teiste kasutatud materjalide puhul. Tugeva intensiivsuse korral määratud pindmise äravoolu vesi on analoogne reoveesetel ja mineraalliiva sisaldavate materjalidega.



Joonis 4.13. Ettevõtte C sete 2 äravoolude vesi, vasakult: drenaaž ja vaheäravool (autori foto).

4.5. Vooluhulkade jagunemine nõrga intensiivsuse korral

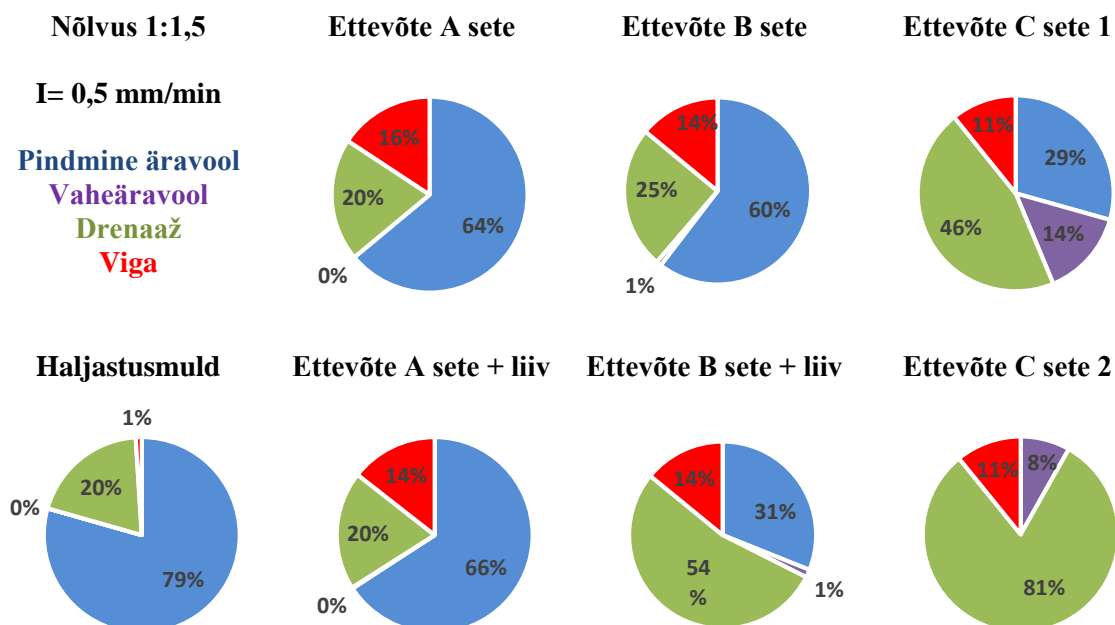
Katsetatavate vihmaintensiivsuste korral täheldati eri nõlvakattematerjalide korral erinevusi nõlvakattematerjalide sajuvee jagunemisel mööda pindmist, vahe- ja drenaažiäravoolu. Tulemused erinesid kasutatavate nõlvakattematerjalide struktuuri ning füüsikaliste omaduste tõttu. Nõrga vihmaintensiivsuse korral jõudis rohkem tehisevihmavett nõlvakatte sisse imbuda ning läbi teemulde materjali drenaaži äravoolu välja voolata. Sette ja liiva segu korral esines vaheäravoolu. Nõlvuste järsenemise mõjul kaasnenud drenaaži äravooluhulga suurenemine võib olla tingitud sellest, et drenenkihis olev vesi muutub surveks. Käesolevas uurimuses kasutatavate materjalide vooluhulkade jagunemise koondtulemused on esitatud lisades (vt lisa 3 ja lisa 4).

Katsetatavatest nõlvustest kõige järsemas olukorras (joonis 4.14) selgub, et anaeroobselt kääritatud settekompostist nõlvakattematerjalid (ettevõtte A setted), haljastusmuld ja ettevõtte B aunkompost käituvad sarnaselt. Kõigi nimetatud materjalide puhul liikus valdav osa sajuveest mööda pindmist äravoolu ning märgatavalt vähem mööda drenaažiäravoolu. Ettevõtte B sette puhul töötas vaheäravool, kuid selle osakaal oli väike (1%).

Ettevõtte B sette ja liiva segu ning ettevõtte C sete 1 vooluhulkade jagunemisi võib pindmise äravoolu osakaalu poolest sarnasteks lugeda. Pindmise äravoolu osakaal oli väiksem kui ülal mainitud materjalidel, kuna osa sademetest jõudis läbi materjali nõrguda – seda iseloomustab ka drenaaži äravoolu osakaal. Seevastu ettevõtte C sete 1 puhul saab eristada vaheäravoolu teket (14%).

Enim erines ülejäänud kasutatavatest nõlvakattematerjalidest ettevõtte C sete 2 – aunkompost, mis sisaldab tugiainena põhku. Nimetatud nõlvakattematerjaliga ei tekkinud nõrga intensiivsuse korral kordagi pindmist äravoolu, esines vaheäravool ning valdav osa sajuveest voolas nõlvalt minema läbi drenaažäravoolu.

Uuringus kasutatud nõlvuse ning vihmaintensiivsuse seadistustega saadud tulemuste põhjal võib kasutatavad nõlvakattematerjalid vooluhulkade jagunemise järgi kolmeks grupeerida. Esimese grupi moodustavad ettevõtte A setted, haljastusmuld ja ettevõtte B sete. Valdav osa sademetest tuli nimetatud kattematerjalide puhul mööda pindmist äravoolu. Teise grupi moodustavad ettevõtte B sette ja liiva segu ning ettevõtte C sete 1. Nimetatud materjalid suutsid juba rohkem sademeid läbi nõlvakatte lasta, mistõttu drenaaži osakaal oli suurem. Ülejäänud materjalidest erineb ettevõtte C sete 2, moodustades kolmanda grupi. Sette 2 näol oli tegu vett hästi läbilaskva materjaliga, mille korral pindmist äravoolu ei tekkinud.



Joonis 4.14. Vooluhulkade jagunemine uuringus kasutatud nõlvakattematerjalide puhul nõrga vihmaintensiivsuse ja nõlvuse 1:1,5 korral.

Vea ulatus (kuni 16%) võib olla tingitud sellest, et kasti minevad veebilansi sisendid ei pruugi vastata tegelikkusele. Aluseks on võetud seos veekao ja veearvesti vahel tugeva vihmaintensiivsuse korral. Intensiivsuse tõustes viga väheneb (joonis 4.15, joonis 4.16).

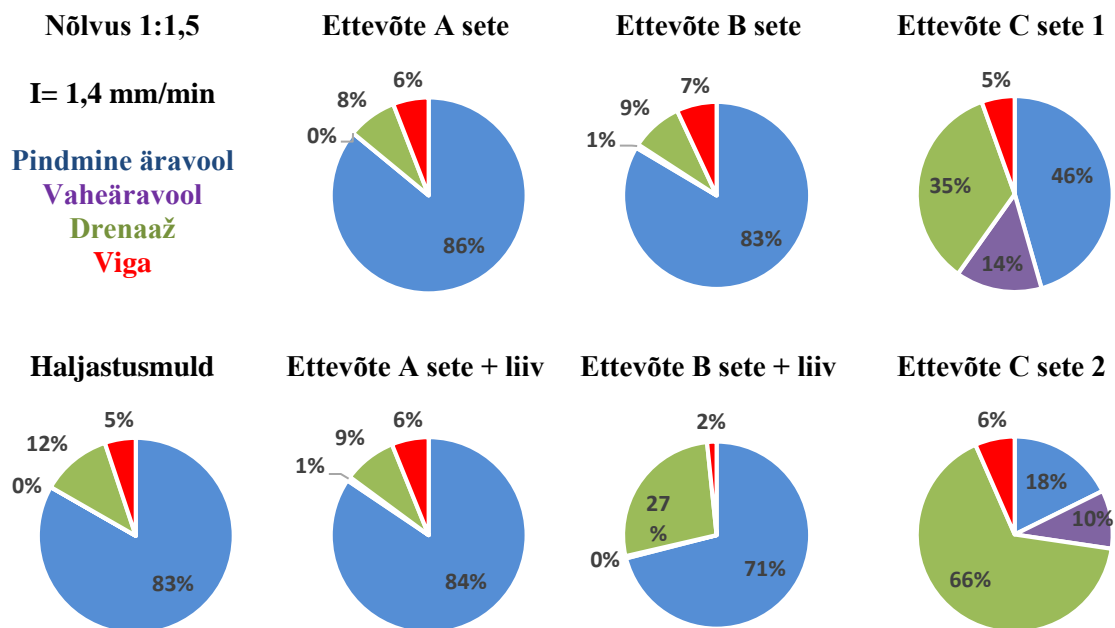
4.6. Vooluhulkade jagunemine keskmise intensiivsuse korral

Käesolevas töös kasutatavaid nõlvakattematerjale keskmise intensiivsusega vihmütades suurenes kõikide materjalide lõikes pindmise äravoolu osakaal. Näiteks tekkis ettevõtte C sette 2 nõlvakattematerjalina kasutamisel alates nõlvusest 1:2 pindmine äravool, mida nõrga intensiivsuse korral ei esinenud kordagi. Samuti suurenes ettevõtte B sette ja mineraalliiva segu nõlvakattematerjalina kasutamisel pindmise äravoolu osakaal umbes 40%. Katsetulemused on toodud lisades (vt lisa 5, lisa 6).

Keskmise intensiivsuse ja nõlvuse 1:1,5 korral töötab enamiku nõlvakattematerjalide puhul pindmine äravool (joonis 4.15). Anaeroobselt käideldud settekomposti sisalduvad nõlvakattematerjalid, haljastusmuld ja ettevõtte B sete käituvad üksteisega sarnaselt. Vaid anaeroobselt kääritatud settekomposti segamisel liivaga esines väikeses koguses vaheäravoolu.

Ettevõtte C sette 1 kasutamisel tõuseb pindmise äravoolu osakaal ning vaheäravoolu osakaal püsib samal tasemel nagu nõrga intensiivsuse puhul. Väheneb drenaažist äravoolava vee hulk. Sama ettevõtte teise variandi (sette 2) puhul hakkas keskmise intensiivsuse korral nõlval toimuma pindmine äravool. Mööda pinda voolas rohkem vett, kuna tihedama saju korral ei olnud nõlvakatte infiltratsioon enam nii efektiivne.

Keskmise vihmaintensiivsusega sooritatud katsete põhjal võib järeldada, et sajuhoo kasvades pindmine äravool suureneb. Haljastusmulla, ettevõtte A setete ja ettevõtte B sette korral oli pindmiste äravoolude protsentuaalne osakaal sarnane.



Joonis 4.15. Vooluhulkade jagunemine uuringus kasutatud nõlvakattematerjalide puhul keskmise vihmaintensiivsuse ja nõlvuse 1:1,5 korral.

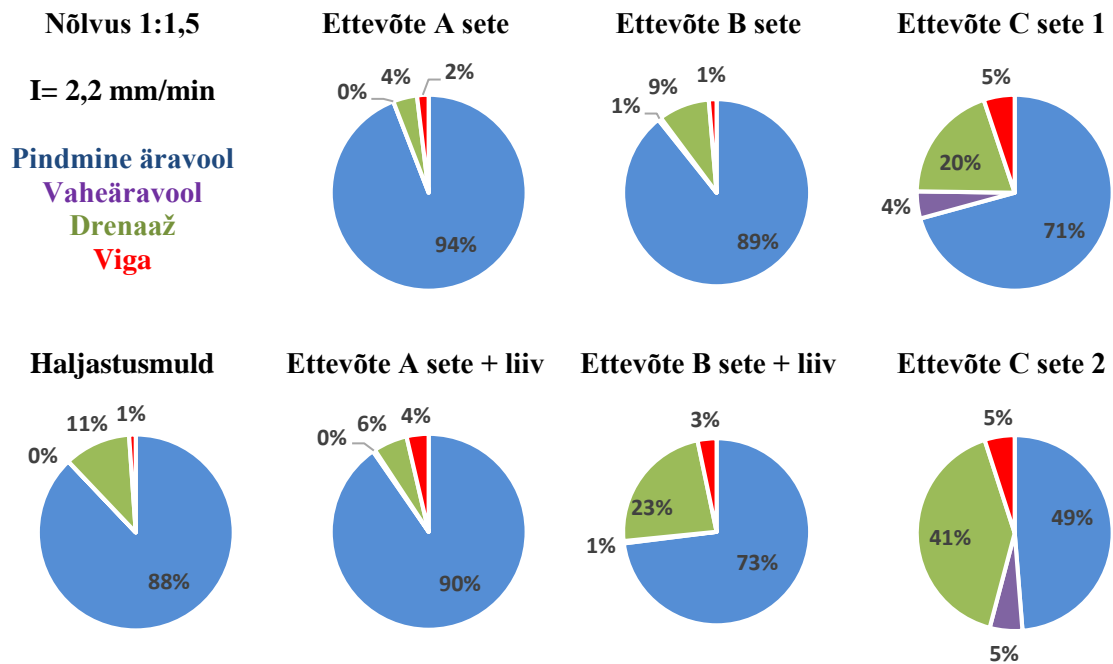
4.7. Vooluhulkade jagunemine tugeva intensiivsuse korral

Tugeva vihmaintensiivsuse korral jagunesid vooluhulgad uuringus kasutatud materjalidel valdavalt pindmiseks äravooluks. Töö käigus katsetatud vihmaintensiivsuse 2,2 mm/min esinemine looduses on pigem haruldane olukord. Nii tugev vihm võib küll esineda lühiajaliselt, aga pika aja vältel esinemine ei ole kuigi sage. Katsete koondtulemused on toodud lisades (vt lisa 7, lisa 8).

Käesolev nõlvus (1:1,5) ning sademete intensiivsus oli kasutatud töös kõige ekstreemsem (joonis 4.16). Anaeroobselt kääritatud settekompostist valmistatud nõlvakattematerjalide tugeva intensiivsusega vihmutamisel oli pindmine äravool kõige intensiivsem. Nende materjalide drenaaži äravoolud jäid sarnastesse piiridesse, liivaga segatud materjali korral oli drenaaži osakaal mõnevõrra suurem. Ettevõtte B sete ja haljastusmuld olid pindmise äravoolu poolest sarnased, küll aga erinesid teineteisest drenaaži äravoolu osakaalult.

Aunkompost ettevõttest C (sete 1) ja ettevõtte B segu liivaga käitusid nõlval sarnaselt. Liivaga segatud nõlvakattematerjal suutis rohkem sajuvett läbi pinnase juhtida ning ettevõtte C settel 1 esines vaheäravoolu.

Antud tingimuste juures käitus nõlvakattematerjalina teistest kõige erinevamalt ettevõtte C sete 2. Peaaegu pool vihmaveest liikus mööda pindmist äravoolu ning 40% mõõdetud kogusest suutis nõrguda läbi aluspinnase ning väljuda läbi drenaaži äravoolu. Antud katse põhjal saab nõlvakattematerjalid jagada taas kolme gruppi – intensiivse, keskmise ja vähem intensiivse pindmise äravooluga grupp.



Joonis 4.16. Vooluhulkade jagunemine uuringus kasutatud nõlvakattematerjalide puhul tugeva vihmaintensiivsuse ja nõlvuse 1:1,5 korral.

5. DISKUSSIOON

Käesolevas töös kasutatud nõlvakattematerjalid erinesid teineteisest struktuurilt, omadustelt, määratud füüsikaliste parameetrite poolest ja orgaanilise aine sisalduselt. Sellest tingituna olid materjalid erineva veejuhtimisvõimega ning nõlvakatetel toimus varieeruvalt erosioon.

Käesolevas uuringus kasutatud nõlvakattematerjalide vooluhulkade jagunemise analüüsist selguvad eripärad materjalide pindmise-, vahe- ja drenaažiäravoolu korral. Kui nõlvade katmisel soovitakse, et sademetest põhjustatud vesi ei imbuks läbi nõlvakatte aluspinnaseni, siis tuleks kasutada halvasti vettjuhtivaid materjale. Käesoleva töö käigus kasutatavatest nõlvakattematerjalidest juhtisid halvasti vett: haljastusmuld, ettevõtte A sete, ettevõtte A sete liivaga ning ettevõtte B sete. Nimetatud materjale saavad kasutada tee-ettevõtted, kui soovitakse tulemust, et läbi pinna nõrguv vesi ei satuks teemulde konstruktsiooni ega põhjustaks seal probleeme.

Segades ettevõtte B setet liivaga, suurenes antud materjali veejuhtivus. Analoozne veejuhtivusvõime oli ka ettevõtte C settel 1. Käesolevaid materjale on sobiv kasutada näiteks olukorras, kui intensiivse sajuhoo korral soovitakse aeglustada teenõlvadelt äravoolava vee kiirust ning kogust. Sademevee osalise infiltreerumisega aeglustub näiteks otsene kiire koormus kraavidele ning eesvoolule, kuhu sadevesi juhitakse. Ettevõtte C aunkomposti puhul kasutati tugiainena turvast. Sajuvee tungimisel nõlvakattematerjali imab turvas endasse vett, mille tulemusena nõlvakattes tekib veevaru. Vesi on aga elutähtis komponent nõlval kasvavale taimestikule. Vee olemasolul ei teki taimedel veepuudusest tingitud närbumist.

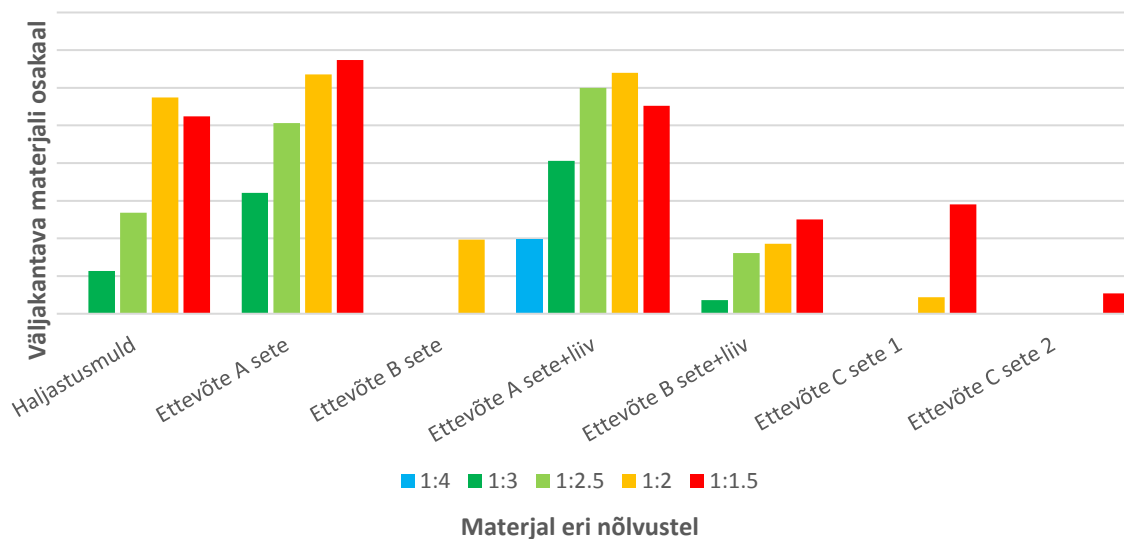
Nõlvade haljastaja seisukohast oleks oluline, et võimalikult palju sadevett infiltreeruks nõlvakattematerjali sisse ja pindmine äravool oleks minimaalne. Pindmine äravool põhjustab pinnaseosakeste ärakandumist nõlvalt. Lisaks võib pindmine äravool põhjustada muruseemnete ärauhtumist nõlvalt ning sellest tingituna tuleb vastavalt vajadusele teostada haljastustöid. Ettevõtte C sete 2 katsetamisel oli pindmise äravoolu osakaal vähim katsetatavatest nõlvakattematerjalidest.

Keskkonnakaitse vaatenurgast on võib-olla soovitud tulemus, kui pindmist äravoolu tekiks minimaalselt, kuna selle tagajärjel toimub osakeste ärakandumine nõlvalt. Reoveesette

kompost võib siiski sisaldada mingil määral haigustekitajaid, raskemetallide- ja ravimijääke, siis reoveesetest valmistatud nõlvakattematerjaliga nõlvu rajades on oluline, et materjal sinna ka jääks. Erosiooni toimetel transporditakse pinnaseosakesi ning seeläbi võib nõlvalt ümbruskonda sattuda reoveesettes leiduvaid kahjulikke aineid. Visuaalse vaatluse käigus hinnati pindmise-, vahe- ja drenaažiäravoolu värvust. Selgus, et ainult settest koosnevatel materjalidel oli pindmine äravool tumedam kui näiteks haljastusmulla või sette ja liiva segu korral. Eraldi tuleks keemiliselt uurida nõlvakasti väljavoolude veekvaliteeti. Hea veeläbilaskvusomadustega nõlvakattematerjalide korral pinnale sadav või katendilt tulev vesi saab imbuda läbi liivast ehitatud teekonstruktsiooni. Liiv käitub justkui filtrina, mis filtreerib nõrgu vee. Katse käigus drenaaži äravoolusid vaadeldes selgus, et haljastusmulla puhul oli vesi enim läbipaistvam. Reoveesette, sette ja liivaga segu korral oli vesi kollakat tooni. Ettevõtte C sete 2 kasutamise korral oli dreeni vesi kollast värvi (joonis 4.13).

Katsenõlva erosioon

Katsete käigus kaaluti mõõtanumatesse kahe minuti jooksul pindmise äravoolu toimetel sattunud pinnaseosakesed ning võrreldi neid omavahel eri nõlvakattematerjalide lõikes. Tugevast vihmaajast tingitud pindmise äravoolu toimetel kanti enim materjali ettevõtte A setet sisaldavates nõlvakattematerjalides (joonis 5.1). Liivaga segatud materjalil toimus erosioon juba kõige laugema (1:4) katsetatava nõlvuse korral. Ettevõtte B ja C 1 katsetes täheldati vähem nõlvalt väljakantava materjali osakaalu, kui haljastusmullaga kaetud nõlva puhul. Ettevõtte B sette puhul ei esinenud katsete käigus pinnaseosakeste erosiooni nõlvusel 1:1,5. Kõige väiksem materjali väljakanne toimus ettevõtte C sete 2 nõlvakatte korral. Nimetatud materjali korral jäi pindmise äravoolu osakaal võrreldes teiste töös kasutatud nõlvakatetega madalaks, seetõttu oli ka erosioonist tingitud osakeste väljakanne väike.



Joonis 5.1. Nõlvakattematerjalide erosioon tugeva vihmaintensiivsuse ja nõlvuste 1:4 kuni 1:1,5 korral.

Orgaanilise aine sisaldus

Kasutatavatel nõlvakattematerjalidel määrati orgaanilise aine sisaldus (tabel 3.3). Selle tulemusena selgus, et ainult reoveesette komposti sisalduvad nõlvakattematerjalid on suure orgaanilise aine sisaldusega. Liiva segamine vähendas orgaanilise aine sisaldust, kuna nõlvakattematerjalis suurenes mineraalne osakaal. Näiteks ettevõtte A ainult sette variandi korral määrati orgaanilise aine sisalduseks 42% ning liivaga settesegul kõigest 15%. Haljastusmullal määrati orgaanilise aine sisalduseks 8%. Keskmiselt mulla huumushorisondi orgaanilise aine sisaldus on 1-5% (Astover *et al.* 2012). Orgaanilise aine sisalduse suurenedes saavad taimed kergemini omandada pinnasest toitaineid. Samuti paraneb veemahutavus (Lillenberg *et al.* 2011). Seega kasutades nõlvakattematerjalina orgaanikarikast settekomposti, paranevad rohttaimestiku kasvutingimused nõlval. Taimestik kasvab kiiremini ning intensiivsemalt, kaitstes nõlva erosiooni negatiivsete tagajärgede eest.

Materjalide veejuhtivus

Laboris määratud materjalidele veejuhtivus Ks ning tulemustest (tabel 3.6) saab järeldada, et aluspinnaseks kasutatud drenliiv on väga heade veejuhtimisomadustega. Väärtuseks mõõdeti 1168 cm/d, teisendatuna 11,68 m/ööpäevas ning antud väärtus vastab jämeliiva ja liivaseguse kruusa filtratsioonimooduli vahemikule (Maastik *et al.* 1995). Ettevõtte A ja

haljastusmullale määratud filtratsioonimoodulid sarnanesid teineteisele. Mõnevõrra suurem filtratsioonimoodul määrati ettevõtte B settele ja ettevõtte C sete 1.

Mineraalliiva segamine reoveesette komposti võib suurendada materjalide veejuhtivusvõimet. See väljendus ka katsetustes erosioonisimulaatoril, ettevõtte B sette näitel. Liivaga segatud nõlvakattematerjali korral oli pindmise äravoolu osakaal väiksem ning дренаaži äravool suurem, võrreldes puhta settega nõlva korral. Sama seost ei täheldatud anaeroobselt kääritatud komposti korral. Määratud veejuhtivuse näitajad erinesid materjalidel peaaegu 3 korda – ettevõtte B sete + liival saadi väärtuseks 113 cm/d ning anaeroobselt kääritatud komposti liivaga segul 39,33 cm/d. Käesolevaid tulemusi võib mõjutada liiva osakaalu hulk proovikeha ruumalas võrreldes sette osakaaluga.

Ettevõtte C sete 2 puhul määrati KSAT seadeldisega veejuhtivuseks 93 cm/d, mis teisendades vihmaintensiivsuse ühikusse teeb 0,65 mm/min. Erosioonisimulaatoris käesoleva nõlvakattematerjaliga nõrga vihmaintensiivsuse korral ei tekkinud pindmist äravoolu, vaid pindmine äravool tekkis keskmise intensiivsuse korral. Käesolev materjal oli väga kore.

Materjalide mehaanilised parameetrid

Nõlvakattematerjalidele määrati mehaanilised parameetrid (tabel 3.7): sisehõõrdenurk φ ja nidusus c . Saadud parameetrite puhul võib järeldada, et ettevõtte B aunkompost püsib paremini nõlval kui teised kasutatud materjalid. Näiteks erinesid ettevõtete A ja B setete sisehõõrdenurgad peaaegu kaks korda. Samad materjalid käitusid erinevalt ka katsete käigus, ettevõtte A sette korral kandus ära rohkem materjali nõlvalt kui ettevõtte B korral. Ettevõtte C sete 2 madal sisehõõrdenurk võib olla tingitud materjali suurest veesisaldusest. Pinnase nihketugevus sõltub materjali veesisaldusest.

KOKKUVÕTE

Reoveepuhastites tekib puhastusprotsessi kõrvalsaadusena toitaineterikast reoveesetet. Setet käideldakse ning selle tulemusel valmivat settekomposti saab taaskasutada. Settekomposti üheks võimaluseks on kasutamine teenõlvadel haljastusmulla asendajana. Settekompost on oma toitainete rikkuse poolest heaks kasvupinnaseks taimestikule. Selle tulemusel kiiresti kasvav taimestik kaitseks nõlvu sademete poolt põhjustatud erosiooni eest.

Magistritöö eesmärgiks oli hinnata käesolevas töös käsitletud nõlvakattematerjalide käitumist katsenõlval laboritingimustes. Materjale katsetati nõlvustel: 1:4, 1:3, 1:2,5, 1:2 ja 1:1,5. Katsetatavad vihmaintensiivsused olid: 0,5 mm/min, 1,4 mm/min ja 2,2 mm/min. Katsed sooritati olukorras, kui nõlva pinnal puudus haljastus. Töös kasutati kokku seitset erinevat nõlvakattematerjali. Nõlvakateteks olid vee-ettevõtetest pärit reoveesette kompostid, reoveesette kompostid segatuna mineraalliivaga ja võrdluseks haljastusmuld.

Nõlvakattematerjale uuriti varasemalt Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituudi maaehituse ja veemajanduse õppetooli laborisse ehitatud erosioonisimulaatoriga. Üheks tingimuseks oli kasutatavaid materjale katsetada vihmaintensiivsuse 2,2 mm/min korral. Selleks tuli täiendada olemasolevat vihmasimulaatorit. Juurde lisati vajalikul hulgal düüse ning kasutati survetõsteseadet, et suurendada süsteemi töö rõhku. Seejärel veenduti tehisevihma ühtluses, selleks arvutati välja Christianseni ühtlase jaotuse koefitsient CU. Lisaks määrati käesolevas magistritöös kasutatavate pinnaste füüsikalised parameetrid ning orgaanilise aine sisaldus. Teimimise käigus määrati nõlvakattematerjalide mehaanilised omadused – nidusus c ja sisehõõrdenurk φ . Samuti selgitati välja laborkatsetega pinnaste veejuhtivusvõime.

Töös kasutatud nõlvakattematerjalid käitusid vihmaintensiivsuste korral erinevalt. Anaeroobse kääritamise teel saadud kompostmaterjalist nõlvakatted ei olnud vettläbilaskvad. Enamik sajuveest tuli mööda pindmist äravoolu ning nõlvalt kandus ära ulatuslikult pinnast. Haljastusmulla kasutamise puhul täheldati sama, kuid võrreldes äravoolava vee kvaliteeti, sisaldas see vähem pinnaseosakesi ja oli heledamat tooni. Ettevõtte B sette korral liiva segamine reoveesette komposti hulka suurendas antud materjali veeläbilaskvusvõimet. Enim läbilaskvam nõlvakattematerjal oli ettevõtte C aunkompost,

mille tugiaineks oli kasutatud ainult põhku. Nimetatud materjal erines oma füüsikalistelt omadustelt teistest – tegu oli väga kerge ja koreda nõlvakattega.

Kui nõlvade katmisel soovitakse tulemust, mille korral sadevesi ei nõrguks läbi nõlvakatte aluspinnaseni, vaid oleks suure pindmise äravoolu osakaaluga, tuleks kasutada vett halvastijuhtivaid materjale. Näiteks selline lahendus oleks sobilik tee-ettevõttele, kuna väheneks oht, et läbi pinna imbuv vesi satuks teemulde konstruktsiooni. Teisalt põhjustab pindmine äravool pinnaseosakeste ärakandumist. Sel juhul kasutades reoveesetel sisaldavat nõlvakatematerjali on oht, et settes olevad kahjulikud ühendid satuvad ümbruskonda, mis tekitab vastuolu keskkonnakaitsega.

KASUTATUD KIRJANDUS

- Aksoy, H., Unal, N. E., Cokgor, S.** (2012). A rainfall simulator for laboratory-scale assessment of rainfall-runoff-sediment transport processes over a two-dimensional flume - *Catena*. Nr 98, lk 63-72.
- Astover, A., Kõlli, R., Roostalu, H., Reintam, E., Leedu, E.** (2012). Mullateadus. Tartu: Eesti Maaülikool. 486 lk.
- Bioneer.** (2018). Vee-ettevõtted avavad üle Eesti reoveepuhastite uksed. [veebileht] <https://www.bioneer.ee/vee-ettev%C3%B5tted-avavad-%C3%BCle-eesti-reoveepuhastite-uksed> (23.04.2019).
- Cerdà, A.** (2007). Soil water erosion on road embankments in eastern Spain. – *Science of the Total Environment*. Nr 378, lk 151-155.
- Chaithong, T.** (2017). Analysis of extreme rainfall-induced slope failure using a rainfall infiltration-infinite slope analysis model. – *International Journal of GEOMATE*. Nr13, lk 156-165.
- Christiansen, J. E.** (1941). The uniformity of application of water by sprinkler systems - *Agricultural Engineering*. Nr 22, lk 89-92.
- De Oña, J., Ferrer, A., Osorio, F.** (2011). Erosion and vegetation cover in road slopes hydroseeded with sewage sludge - *Transportation Research Part D*. Nr 16, lk 465-468.
- Drechel, P., Qadir, M., Wichelns, D.** (2015). Wastewater Economic Asset in an Urbanizing World. [on-line] Spring (28.04.2019)
- Earle, S.** (2015). Physical Geology. [on-line] <https://opentextbc.ca/geology/chapter/15-1-factors-that-control-slope-stability/> (25.04.2019).
- Gray, H., D., Sotir, B., R.** (1996). Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization: A practical guide for erosion control. Canada: John Wiley and Sons INC. 378 lk.
- Jaanisoo, V.** (2011). Pinnasemehaania. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool. 247 lk.
- Jäätmeseadus (Vastu võetud 28.01.2004, muudetud, viimati jõustunud 15.03.2019 – *Riigi teataja* <https://www.riigiteataja.ee/akt/114062013006?leiaKehtiv> (25.04.2019).
- Kamenik, Jüri.** 2015. Eesti sademete ekstreemumite korduvusperioodid. Magistritöö. Tartu Ülikool. Ökoloogia ja Maateaduste Instituut. Tartu. 44 lk.
- Keskkonnaministeerium. (2017a). Reoveesetest saab väärtuslik tooraine. [veebileht] <https://www.envir.ee/et/uudised/reoveesetest-saab-vaartuslik-tooraine> (28.04.2019).
- Keskkonnaministeerium. (2017b). Reoveesette käitlemine – peamised probleemid ja võimalikud lahendused. [veebileht] https://www.envir.ee/sites/default/files/reoveesette_kaitlemine_-_peamised_probleemid_ja_voimalikud_lahendused_0.pdf (28.04.2019).
- Keskkonnaministeerium. (2017c). Reoveesette taaskasutus. [veebileht] <https://www.envir.ee/et/eesmargid-tegevused/vesi/reoveesette-taaskasutus> (28.04.2019).

- Keskkonnaministeerium. (2018). Riigi jäätmekava 2014-2020. [veebileht] <https://www.envir.ee/et/eesmargid-tegevused/jaatmed/riigi-jaatmekava-2014-2020> (28.04.2019).
- Keskkonnasõnaraamat. (2004). /Toim. Maastik, A. [veebileht] <https://mot.kielikone.fi/mot/indic/netmot.exe?UI=ened&height=165> (23.04.2019).
- Keskkonnatehnika. (2017). Reoveesetest toodetud komposti saab sertifitseerida. [veebileht] <https://keskkonnatehnika.ee/reoveesetest-toodetud-komposti-sertifitseerimine/> (25.04.2019).
- Kriipsalu, M.** (2016). Settekäitlus. Tartu: Eesti Maaülikool.
- Kriipsalu, M., Maastik, A., Truu, J.** (2016). Jäätmekäitlus ja pinnase tervendamine. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool. 376 lk.
- Lemmiksoo, V., Tenno, T., Mölder, E.** (2015a). Regionaalsete reoveesete käitlemise lahenduste väljatöötamine ja jäätmete lakkamise kriteeriumite väljatöötamine reoveesete kohta. II osa aruanne. Tartu. https://www.envir.ee/sites/default/files/reoveesete_too_ii_aruanne.pdf (20.04.2019).
- Lemmiksoo, V., Tenno, T., Mölder, E., Tamm, A.** (2015b). Regionaalsete reoveesete käitlemise lahenduste väljatöötamine ja jäätmete lakkamise kriteeriumite väljatöötamine reoveesete kohta. III osa aruanne. Tartu. https://www.envir.ee/sites/default/files/iii_osa.pdf (20.04.2019).
- Leppik, V.** (2012). Geotehnika laboratoorsed tööd. Tartu: Eesti Maaülikool.
- Lillenberg, M., Haiba, E., Nei, L.** (2011). Reoveesete sobivusest põlluväetiseks. – Keskkonnatehnika. Nr 8, lk 16-18.
- Lora, M., Camporese, M., Salandin, P.** (2016). Design and performance of a nozzle-type rainfall simulator for landslide triggering experiments - *Catena*. Nr 140, lk 77-89.
- Maanteeamet. (2018). Riigiteede haljastustööde juhise. [veebileht] https://www.mnt.ee/sites/default/files/content-editors/Failid/Juhendid/ehitus/riigiteede_haljastustoo_de_juhis_2018.pdf (19.05.2019).
- Maastik, A.** (1984). Veekaitse põllumajanduses. Tallinn: Valgus. 296 lk.
- Maastik, A., Danilišina, G., Gross, M., Kriipsalu, M., Tamm, P., Tenno, T.** (2011). Väikeste reoveepuhastite (jõudlus kuni 2000 ie) hooldamise juhend. Tartu. 62 lk.
- Maastik, A., Haldre, H., Koppel, T., Paal, L.** (1995). Hüdraulika ja pumbad. Tartu: Greif trükikoda. 467 lk.
- Maksimova, S., Kosaurova, D., Pesheva, A.** (2015). Recycling of Wastewater Treatment Plants Sludge in Urban Landscaping in West Siberia – *Procedia Engineering*. Nr 117, lk 232-238.
- Meter Group. (2019). Operation manual KSAT. [veebileht] https://metergroup-83d0.kxcdn.com/app/uploads/2018/12/KSAT_Manual.042019.pdf (07.05.2019).
- Nelson, A.** (2013). Slope Stability, Triggering Events, Mass Movement Hazards. [veebileht] http://www.tulane.edu/~sanelson/Natural_Disasters/slopestability.htm (30.04.2019)

- Regionaalsete reoveesette käitlemise lahenduste väljatöötamine ja jäätmete lakkamise kriteeriumite väljatöötamine reoveesette kohta. I osa aruanne (2015). Tartu: OÜ aqua consult baltic. https://www.envir.ee/sites/default/files/reoveesette_too_i_aruanne.pdf (20.04.2019)
- Reintam, E.** (2010). Keskkonnainvesteeringute Keskuse Keskkonnakorralduse projekt nr 23. Mullafüüsika labori sisustamise aruanne 2010. Tartu: Eesti Maaülikooli Põllumajandus- ja keskkonnainstituut. http://pk.emu.ee/userfiles/instituudid/pk/file/Muld/Aruanne_mullafuysika_labor.pdf (28.04.2019).
- Reoveesette põllumajanduses, haljastuses ja rekultiveerimisel kasutamise nõuded. (Vastu võetud 30.12.2002, muudetud, viimati jõustunud 02.12.2017 – *Riigi teataja* <https://www.riigiteataja.ee/akt/761407?leiaKehtiv> (25.04.2019).
- Reoveesetest toote valmistamise nõuded (Vastu võetud 19.07.2017, avaldatud, viimati jõustunud 31.07.2017 – *Riigi teataja* <https://www.riigiteataja.ee/akt/128072017004> (25.04.2019).
- Riigi Ilmateenistus. (2019a). Sademete rekordid. <https://www.ilmateenistus.ee/kliima/kliimanormid/sademed/> (20.04.2019).
- Riigi Ilmateenistus. (2019b). Hoiatuste kriteeriumid. <https://www.ilmateenistus.ee/ilmatarkus/kasulik-teada/hoiatuste-kriteeriumid/> (02.05.2019).
- Ritzema, P. H.** (1994). Drainage Principles and Applications. Second Edition. Wageningen: The Netherlands. 1107 lk.
- Sahin, Y.** (2013). Laboratory tests to study stability mechanism of rainfall infiltrated unsaturated fine-grained soil slopes developing into shallow landslides and their hydraulic properties. Master of science. Izmir Institute of Technology. Izmir. 136 lk.
- Skuodis, Š.** (2018). Slope Restoration and Topographical Monitoring for Heritage Preservation of Gediminas Hill and Castle Tower in Lithuania. – *The HKIE Geotechnical Division Annual Seminar 2018*, lk 121-133.
- Swierczek, L., Cieslik, B., Konieczka, P.** (2018). The potential of raw sewage sludge in construction industry – A review – *Journal of Cleaner Production*. Nr 200, lk 342-356
- Tallinna Vesi. (2019) Reoveepuhastus. Reovee puhastusprotsess. [veebileht] <https://tallinnavesi.ee/ettevete/gegevused/reoveepuhastus/heitvee-puhastusprotsess/> (29.04.2019).
- Tamm, T., Jüriöö, R., Kriipsalu, M.** (2018). Soovitused reoveesette kasutamiseks nõlvadel – aruanne. Eesti Maaülikool
- Tammets, T.** (2012). Eesti ilma riskid: 2., täiendatud ja parandatud trükk. Tallinn: Eesti Entsüklopeediakirjastus koostöös Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia instituudiga. 151 lk.
- Vagula, Jaan.** 2018. Teenõlvakatte erosioonisimulaatori projekteerimine ja katsetamine. Magistritöö. Eesti Maaülikool Metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu. 82 lk.

LISAD

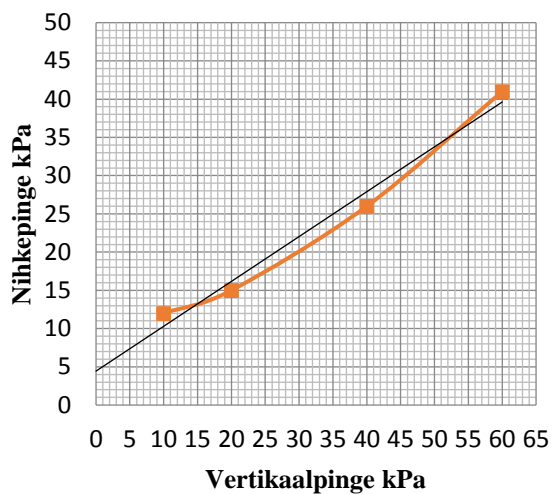
Lisa 1. Vihmaintensiivsuste katsetulemuste koondtabel

Katse nr	Veemass, g	dm ³	dm	Veekiht, mm	Intensiivsus, mm/min	Aeg, min	Veearvesti algnäit, m ³	Veearvesti lõppnäit, m ³	W _{3min} , l	Rõhk, bar	Nõlvus	Horisontaal projektsiooni pindala, dm ²	Q _{kadu} W _{3min} järgi, %
1	6228	6,228	0,0647	6,47	2,16	3	6,3286	6,3396	11	4	1:1,5	96	45
2	6242	6,242	0,0649	6,49	2,16	3	6,3431	6,3542	11,1	4	1:1,5	96	45
3	6847	6,847	0,0661	6,61	2,20	3	6,3872	6,3983	11,1	4	1:2	104	38
4	6832	6,832	0,0659	6,59	2,20	3	6,4032	6,4143	11,1	4	1:2	104	38
5	7175	7,175	0,0665	6,65	2,22	3	6,358	6,3691	11,1	4	1:2,5	108	35
6	7176	7,176	0,0665	6,65	2,22	3	6,3722	6,3833	11,1	4	1:2,5	108	35
7	7499	7,499	0,0677	6,77	2,26	3	6,425	6,4361	11,1	4	1:3	111	33
8	7485	7,485	0,0676	6,76	2,25	3	6,4413	6,4524	11,1	4	1:3	111	33
9	7957	7,957	0,0683	6,83	2,28	3	6,4629	6,4739	11	4	algasend	117	28
10	7982	7,982	0,0685	6,85	2,28	3	6,4765	6,4876	11,1	4	algasend	117	28

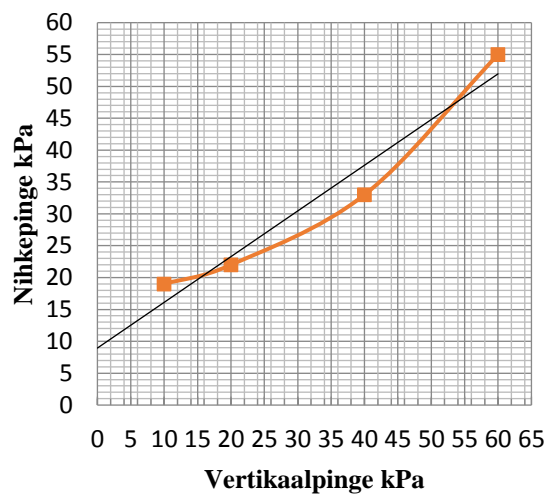
Katse nr	Veemass, g	dm ³	dm	Veekiht, mm	Intensiivsus, mm/min	Aeg, min	Veearvesti algnäit, m ³	Veearvesti lõppnäit, m ³	W _{aeg,min} , l	Rõhk, bar	Nõlvus	Solenoidklapp avatud, 10 ⁻³ s	Solenoidklapp kinni, 10 ⁻³ s
1	5101	5,101	0,0436	4,36	2,18	2	12,0402	12,0475	7,3	4	Nõlvakast horisontaalne ehk algasend	2200	1420
2	5132	5,132	0,0439	4,39	2,19	2	12,0512	12,0586	7,4	4		2200	1420
3	4687	4,687	0,0401	4,01	2,00	2	12,0687	12,0751	6,4	4		2200	4340
4	4695	4,695	0,0401	4,01	2,01	2	12,0781	12,0846	6,5	4		2200	4340
5	3366	3,366	0,0288	2,88	1,44	2	12,0893	12,0938	4,5	4		2200	7160
6	3284	3,284	0,0281	2,81	1,40	2	12,0978	12,1023	4,5	4		2200	7160
7	2478	2,478	0,0212	2,12	1,06	2	12,1073	12,1109	3,6	4		2200	10340
8	2453	2,453	0,0210	2,10	1,05	2	12,113	12,1165	3,5	4		2200	10340
9	1823	1,823	0,0156	1,56	0,78	2	12,1207	12,1232	2,5	4		2200	14380
10	1784	1,784	0,0152	1,52	0,76	2	12,1251	12,1276	2,5	4		2200	14380
11	1297	1,297	0,0111	1,11	0,55	2	12,13	12,1318	1,8	4		2200	20460
12	1305	1,305	0,0112	1,12	0,56	2	12,1331	12,1349	1,8	4		2200	20460

Lisa 2. Nõlvakattematerjalide nihkediagrammid

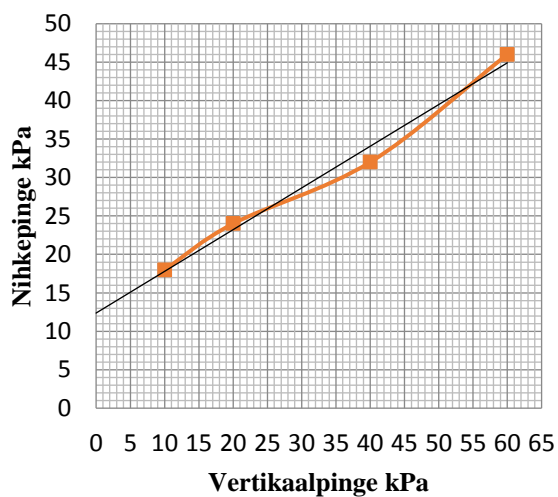
Haljastusmuld



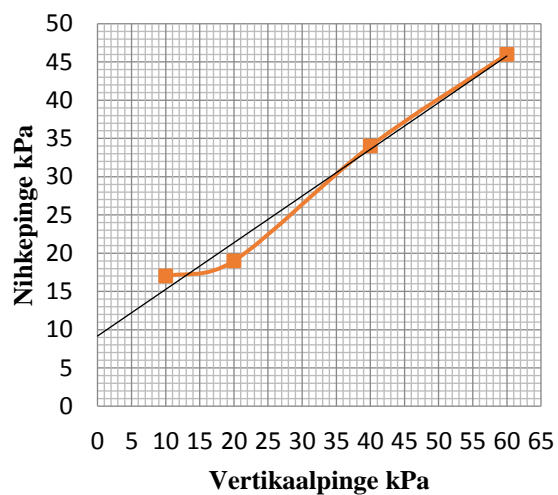
Ettevõtte B sete



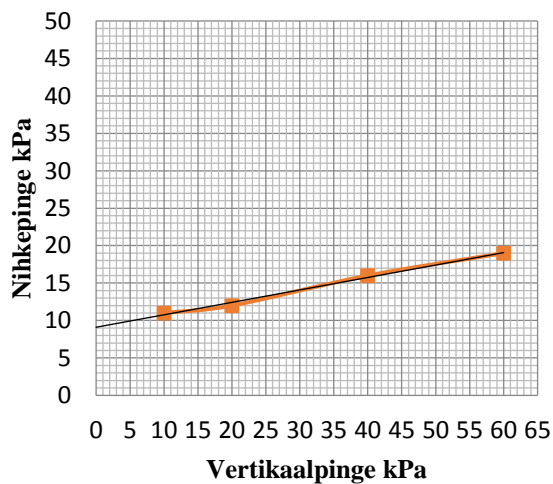
Ettevõtte A sete+liiv



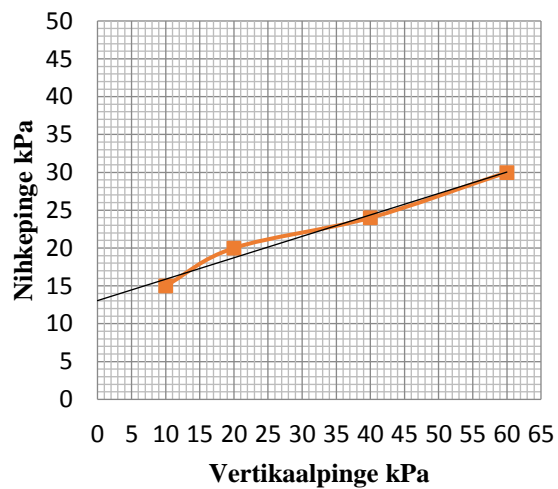
Ettevõtte B sete+liiv



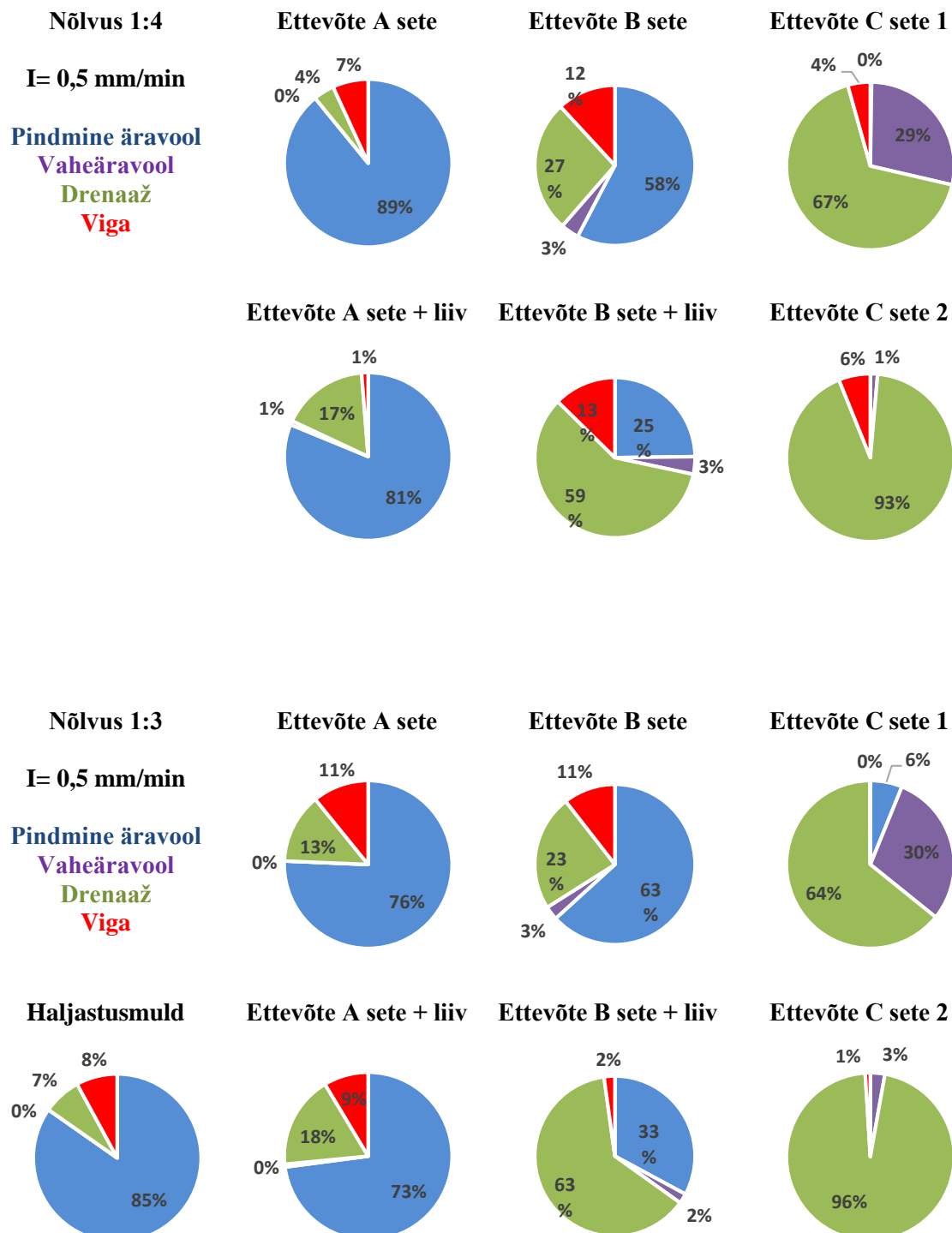
Ettevõtte C sete 1



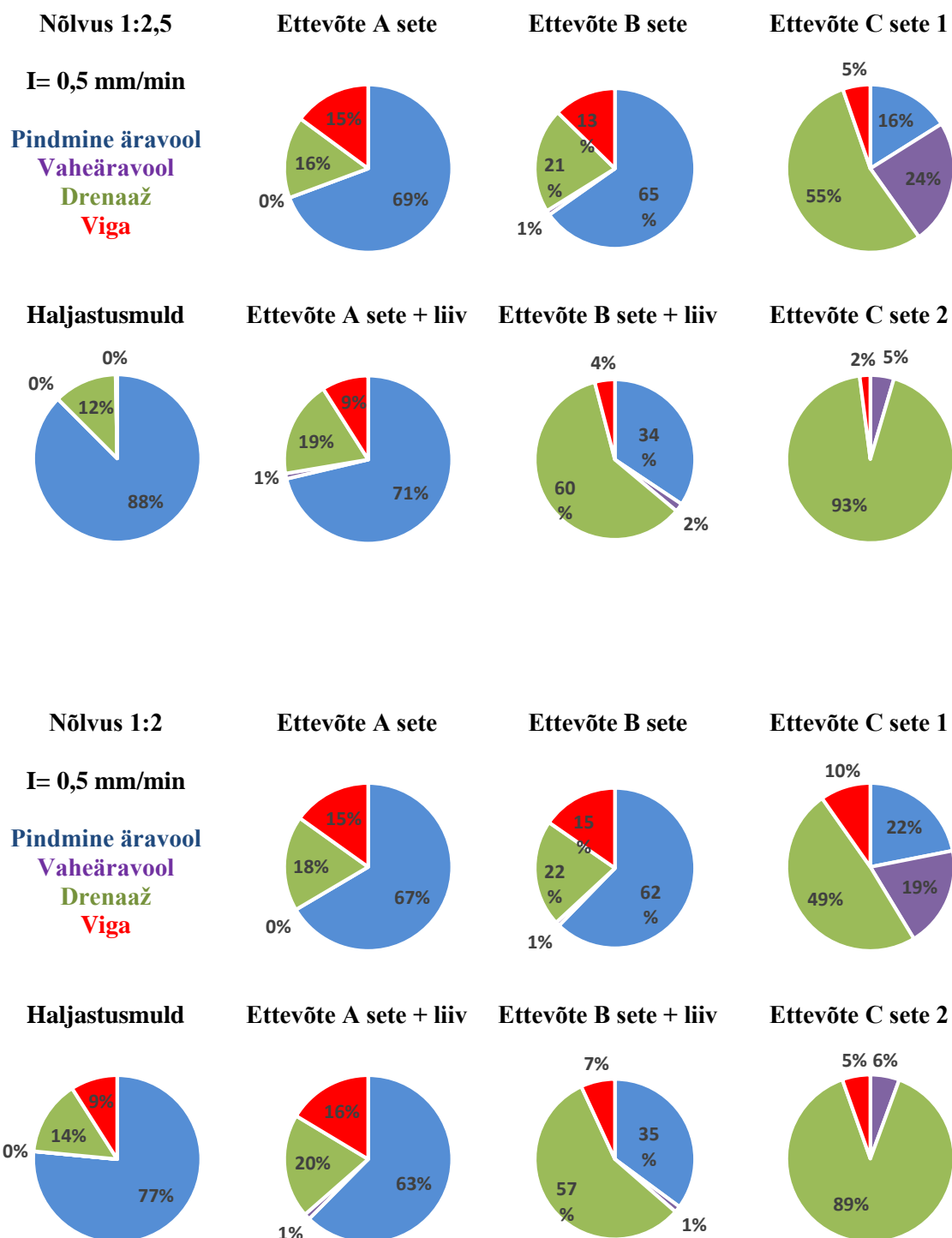
Ettevõtte C sete 2



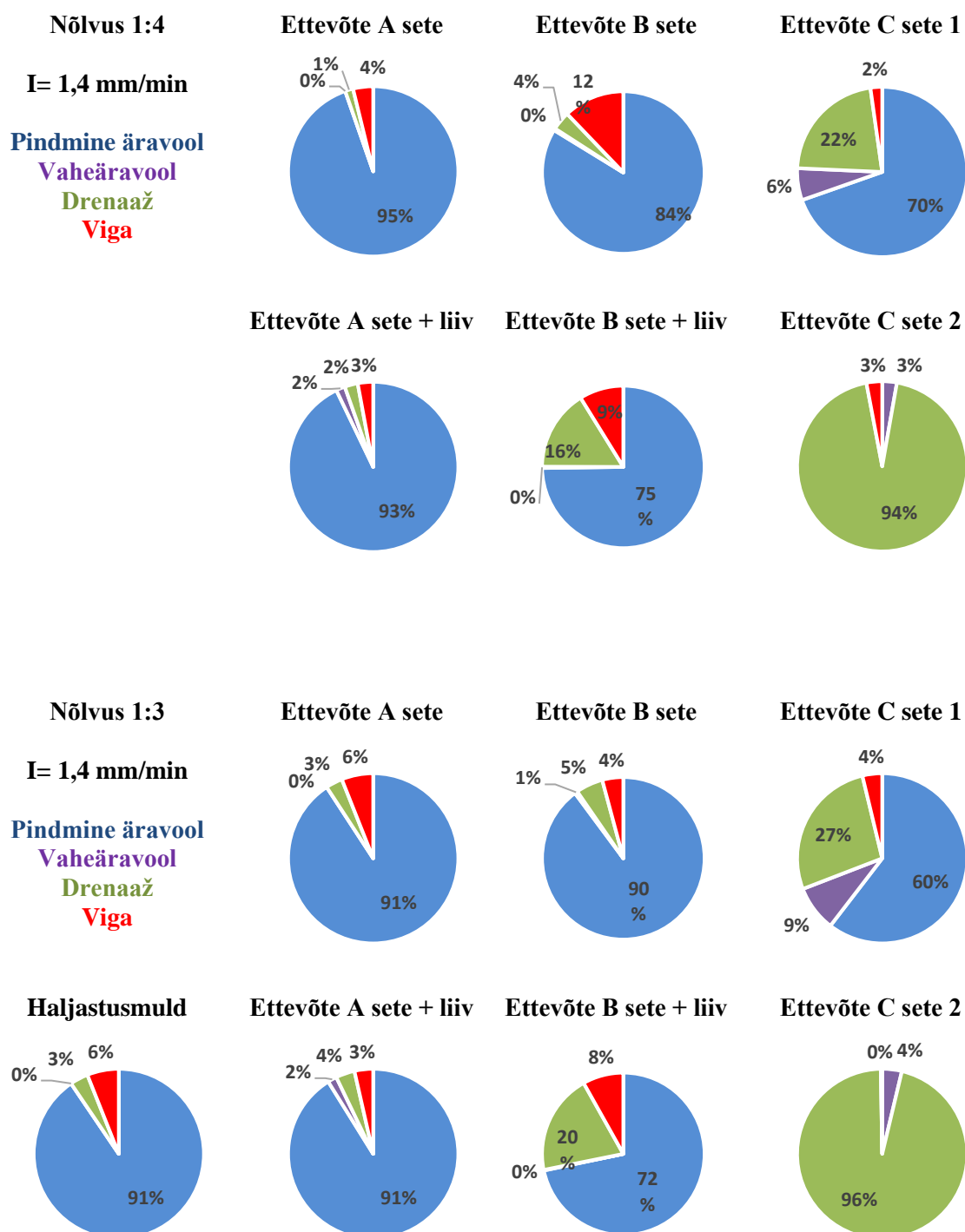
Lisa 3. Nõlvakattematerjalide vooluhulkade jagunemine $I=0,5$ mm/min nõlvuste 1:4 ja 1:3 korral



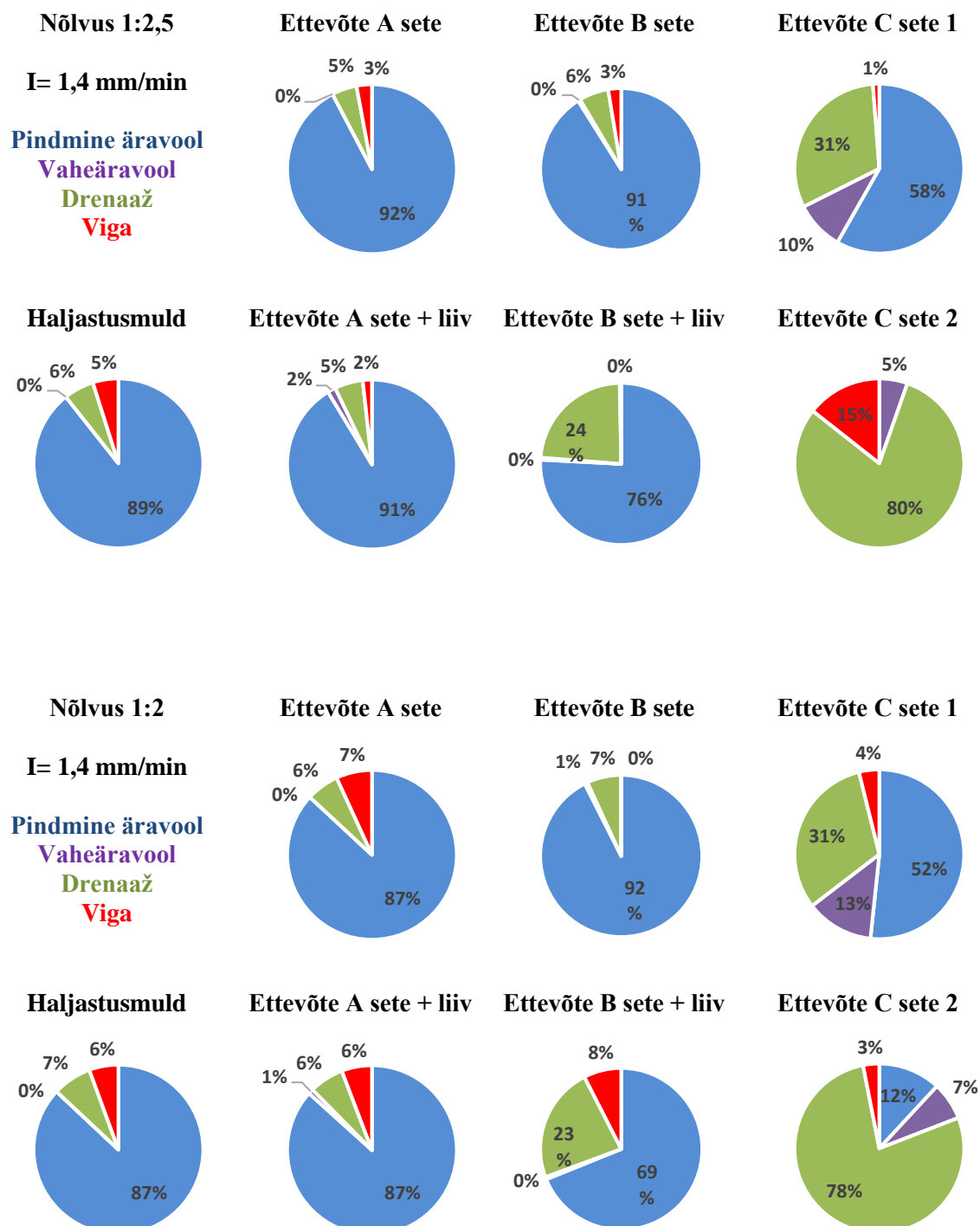
Lisa 4. Nõlvakattematerjalide vooluhulkade jagunemine $I=0,5$ mm/min nõlvuste 1:2,5 ja 1:2 korral



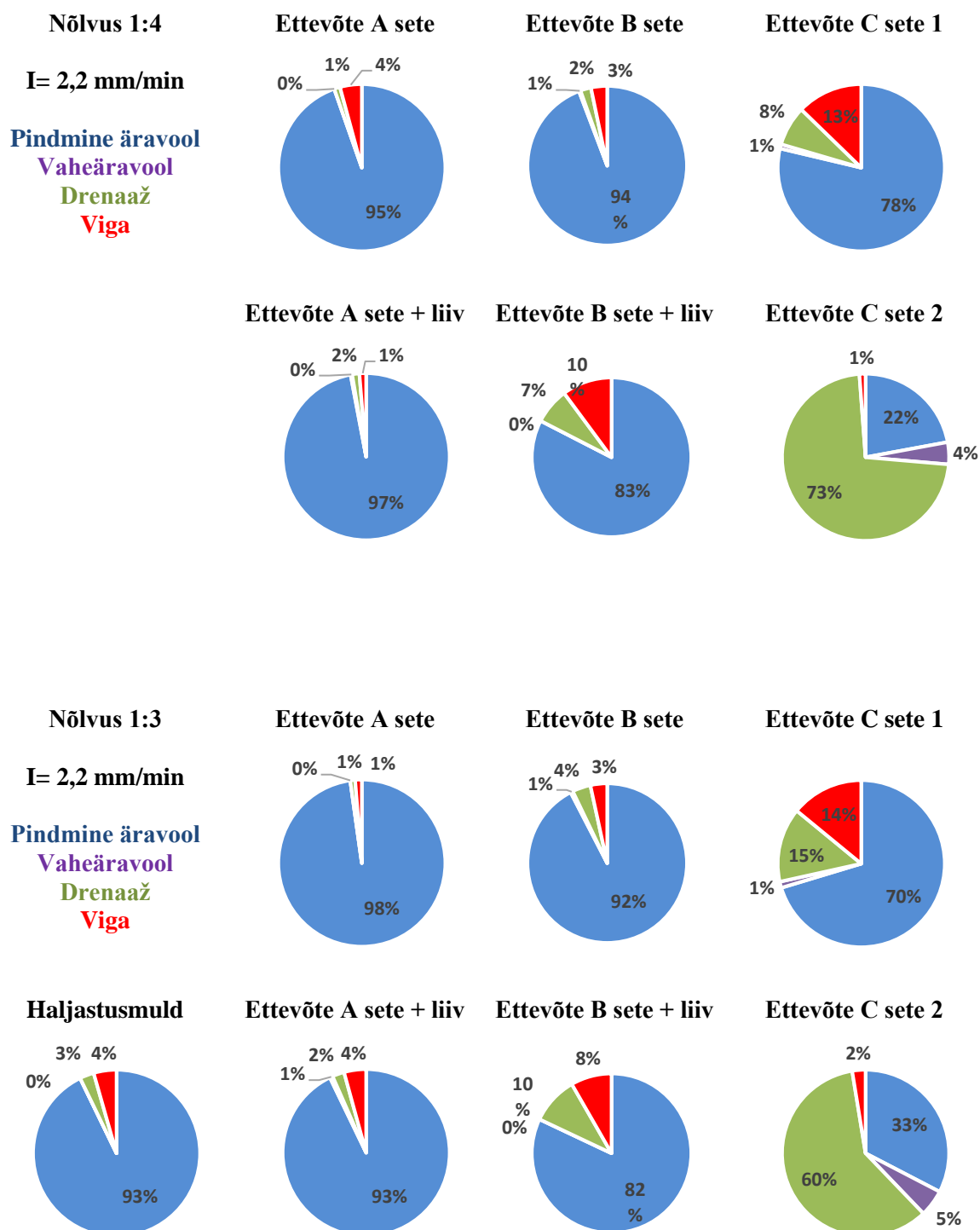
Lisa 5. Nõlvakattematerjalide vooluhulkade jagunemine I=1,4 mm/min nõlvuste 1:4 ja 1:3 korral



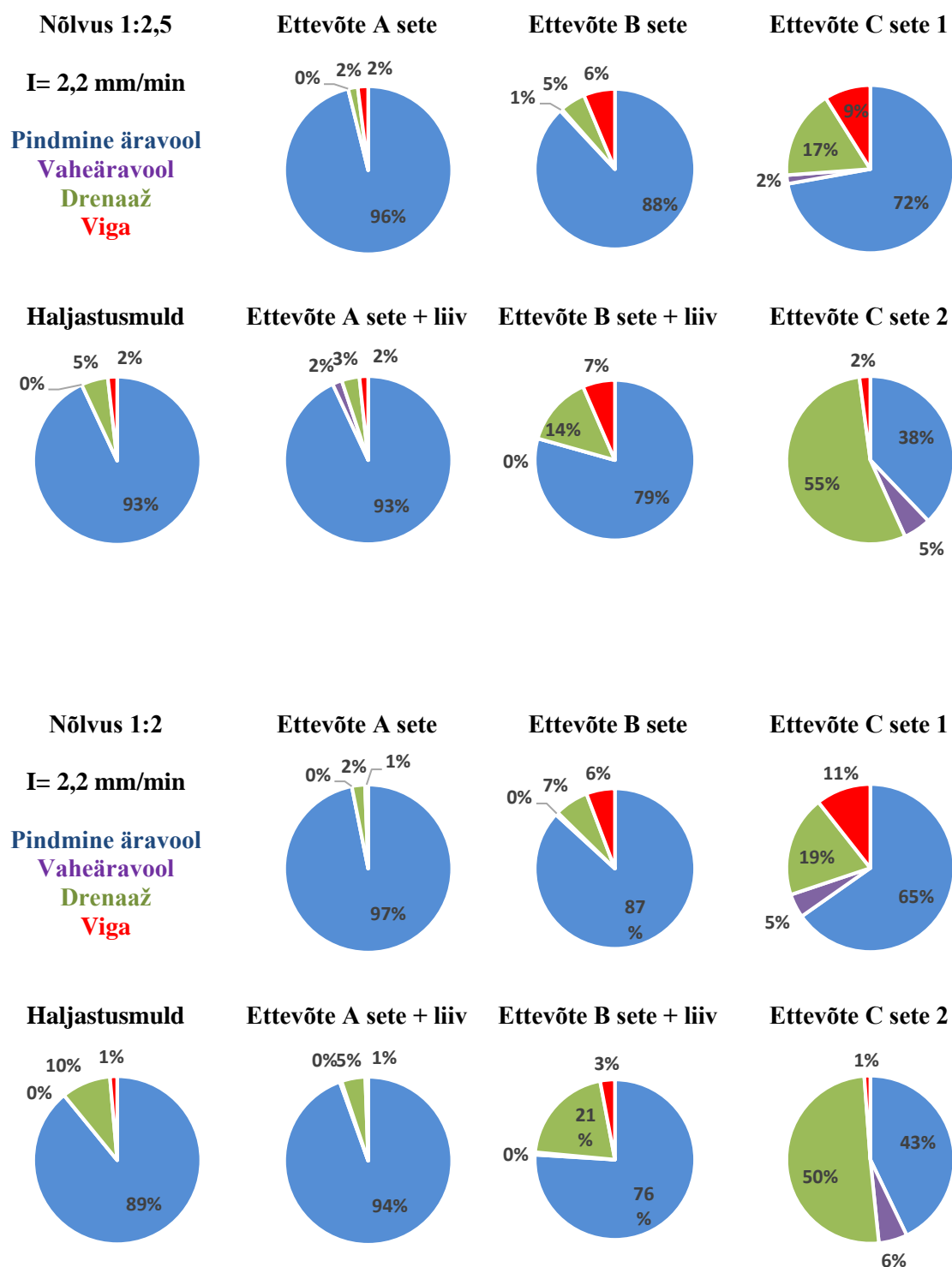
Lisa 6. Nõlvakattematerjalide vooluhulkade jagunemine I=1,4 mm/min nõlvuste 1:2,5 ja 1:2 korral



Lisa 7. Nõlvakattematerjalide vooluhulkade jagunemine I=2,2 mm/min nõlvuste 1:4 ja 1:3 korral



Lisa 8. Nõlvakattematerjalide vooluhulkade jagunemine I=2,2 mm/min nõlvuste 1:2,5 ja 1:2 korral



Lisa 9. Kasutatavate nõlvakattematerjalide päritolu ettevõtted

Tähis	Päritolu ettevõte
Ettevõte A sete	
Ettevõte A sete+liiv	
Ettevõte B sete	
Ettevõte B sete+liiv	
Ettevõte C sete 1	
Ettevõte C sete 2	

Lisa 10. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Reio Jüriöö,
(sünnipäev pp/kuu/aa 26.06.1993)

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö Erosioonisimulaatori katsetamine nõlvakattematerjalide uurimiseks, mille juhendaja on Toomas Tamm,

- 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
- 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
- 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

allkiri

Tartu, 3.06.2019

Juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)